



SOLUCIONES AL PROBLEMA AMBIENTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS: RIEGO DE CULTIVOS Y ZONAS VERDES

Autor:

Carlos Gregorio Hernández Díaz-Ambrona

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos

Universidad Politécnica de Madrid

Madrid 1998

Citar este trabajo:

Hernández Díaz-Ambrona, C.G. 1998. Soluciones al problema ambiental de las aguas residuales urbanas: riego de cultivos y zonas verdes. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Disponible en <http://oa.upm.es/>

**SOLUCIONES AL PROBLEMA AMBIENTAL DE LAS AGUAS
RESIDUALES URBANAS: RIEGO DE CULTIVOS Y ZONAS VERDES**

Trabajo presentado al premio Bancaixa iniciativas sobre el
medioambiente 1998

Modalidad Divulgadora/Didáctica
Fundació Bancaixa

seudónimo: ALBATROS

Octubre de 1998

«La vida está en constante movimiento y transformación. Aprovechados con los frutos del sol y la tierra, del agua y el aire, continuamente crecemos y creamos, educamos y organizamos, destruimos y morimos. Y a medida que cambiamos, el mundo cambia con nosotros. La comunidad humana crece y se hace más compleja mientras aumentan sus demandas al mundo natural. Cada día vaciamos más el depósito de los recursos de la tierra y en el proceso generamos más desechos.»

La Tierra en juego

Al Gore, 1992

T*enemos la responsabilidad de alimentar a la tierra y el deber de transmitir el legado natural a las futuras generaciones en mejores condiciones que las nuestras, tenemos un compromiso entre hoy y el futuro.*

Albatros

PRESENTACIÓN

El presente trabajo constituye una aportación original a un tema relativamente reciente cual es la gestión y manejo de las aguas residuales urbanas, como alternativa al vertido que se viene produciendo a los cauces de los ríos. Vertidos que generan un impacto debido a múltiples razones. Entre las que se encuentra el tema de la calidad del agua, por que es sabido que, hoy en día, aunque los procesos de depuración consigan rendimientos de eliminación de sustancias y contaminantes superiores al 90 por ciento, la mezcla de esta agua con la que tiene el cauce natural, de características diferentes, produce una perturbación en las condiciones de ese cauce, incluso se generan corrientes de agua en épocas que no habría, modificando el ecosistema de ribera natural. Estos problemas ambientales, tienen hoy solución si se emplea estas aguas para otros usos como son los agrarios.

Elegir la agricultura para la descarga de estas aguas no es una cuestión baladí. Se trata de aprovechar el alto contenido en materia orgánica, sustancias como el nitrógeno y el fósforo y otros micronutrientes, que se concentran en este tipo de aguas y que son catalogados como contaminantes. Pero desgraciadamente el agua no sólo contiene estos productos beneficiosos sino también muchos otros, en concentraciones diversas que pueden afectar a las plantas, al suelo o a los animales, y al hombre ya sea de forma directa o indirecta. Es por ello que el empleo de estas aguas para el riego de cultivos o zonas verdes tenga que cumplir unos requisitos determinados y unas normas que deben ser de obligado cumplimiento. Mientras la legislación Europea, Estatal o Autónoma, en algunos casos, no tienen regulado estos usos, si debemos seguir los distintos manuales que al respecto existen y al que con este texto queremos contribuir, como guía, manual o como aporte de soluciones prácticas para el uso adecuado de este tipo de aguas.

Un área geográfica como el levante español que se caracteriza por tener una agricultura puntera y unas áreas urbanas extensas, especialmente durante el verano, debido a su atractivo turístico, puede disponer de importantes volúmenes de aguas residuales urbanos justo cuanto más falta hacen para la agricultura.

Hemos firmado este trabajo como Albatros. Pues esta ave, desde su vuelo vigila nuestras aguas. Es una ave que ha hecho de la mar su casa, surcando incansablemente, planeando sobre la mayor superficie del globo, ave elegante, ágil y rápida, que mira con el pasar de los tiempos como su casa se ha ido llenando de contaminates, de mareas negras, de residuos, etc.. Igual que el Albatros observamos sigilosos y atentos que pasa con nuestro entorno que hacemos con el medio ambiente, que queremos dejar a nuestros hijos.

Albatros

Octubre 1998

ÍNDICE

1. EL PROBLEMA DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	5
2. TIPIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	13
3. NORMAS PARA EL EMPLEO DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS EN EL RIEGO DE CULTIVOS.	23
4. CALIDADES EXIGIBLES AL AGUA RESIDUAL DEPURADA PARA SU EMPLEO EN EL RIEGO AGRÍCOLA.....	31
4.1 Características físicas del agua de riego	36
4.2 El contenido de sales y la salinidad del agua de riego.....	38
4.3 Alteración de la capacidad de infiltración de agua. Riesgo de sodificación	39
4.4 El agua residual como fuente de aporte de elementos nutritivos para las plantas.....	42
4.5 Contenido en microelementos	43
4.6 Características biológicas de las aguas residuales	45
4.7 Patógenos presentes en las aguas residuales	46
4.8 Microcontaminantes de origen orgánicos	47
4.9 Otras características particulares.....	49
5. EL CULTIVO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS	50
5.1 Exigencias que tienen los cultivos	56
5.2 Respuestas de los cultivos frente a las aguas de baja calidad.	60
5.2.1 Tolerancia de los cultivos a la salinidad	62
5.2.2 Tolerancia de los cultivos al boro	67
5.2.3 Tolerancia a otros elementos presentes en el agua residual.....	70
5.2.4 Efecto de los organismos patógenos sobre los cultivos.....	73
5.3 Los cultivos ante las aguas residuales.....	73
5.4 Condicionantes de calidad que deben cumplir los cultivos que se riegan con aguas residuales depuradas	75
5.5 El suelo como elemento depurador	75
5.5.1 Comportamiento de los microelementos en el suelo	78
6. MANEJO DEL RIEGO.....	80
6.1 Métodos de riego	81
6.2 Necesidades de un sistema de drenaje adecuado	85
6.3 Manejo del sistema de riego y drenaje	86
6.4 Otras recomendaciones para el uso de aguas residuales en riegos	88
7. HACIA UN USO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	90
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

1. EL PROBLEMA DE LAS AGUAS RESIDUALES

El agua es un recursos indispensable para la vida su conservación y adecuado uso nos corresponde a todos. El crecimiento y desarrollo de los núcleos urbanos se realiza sobre la base de unas necesidades mayores de este recurso, pero durante su uso se incorporan contaminantes y otras sustancias que alteran sus composición inicial, por lo que no pueden retornarse directamente a los cauces naturales de donde provenían ni verterse directamente al mar, tienen que pasar antes por un proceso más o menos intenso, más o menos eficaz, de depuración, que tampoco va a ser garantía de salubridad. Estamos, ante un claro problema medioambiental, al que la actividad agraria y forestal puede aportar soluciones. Aparecen en muchos casos conflictos para el aprovechamiento prioritario de este recursos que es escaso y parcialmente renovable. Es necesario una gestión integrada del ciclo hidrológico para mantener las actuales zonas de riegos compatibles con el medioambiente, con las zonas húmedas costeras y con el desarrollo urbano e industrial. Necesitamos un desarrollo sostenible que garantice la disponibilidades de recursos y los niveles de producción actuales a largo plazo. España, como país frontera entre el Norte húmedo y el Sur seco, puede jugar un papel importante en el desarrollo de nuevas técnicas de manejo y gestión del agua, que a la vez que respeten el medio ambiente en todo el ciclo hidrológico, permitan reducir la variabilidad e incertidumbre de la producción agraria en zonas con escasas precipitaciones. No se trata, de incrementar las superficies puestas en riego o cambiar los sistemas de cultivo, sino mejorar los sistemas actuales para dotarles de estabilidad y seguridad, aprovechando nuevos recursos hídricos, a la vez que se dan soluciones al agua residual depurada.

La producción de alimentos está alcanzando máximos históricos, debido en gran

medida «a la aplicación satisfactoria de técnicas agronómicas modernas, y en particular a la introducción y aplicación de variedades de trigo y arroz de alto rendimiento, entre otras especies, unidas a un aumento de la aplicación de fertilizantes a suelos con humedad suficiente y a medidas más eficaces de lucha contra plagas». Aunque estas mejoras están desigualmente repartidas (Hernández, 1996).

La agricultura consume más de dos tercios del agua dulce disponible en el mundo. Es por esta razón, por la cual el manejo adecuado de este recurso es indispensable en muchas grandes zonas, primero para el consumo humano y después para su destino agrícola, pero coincide que falta donde allí más se necesita.

La reutilización de las aguas residuales para riego de cultivos y zonas verdes supone la liberación de parte del recurso hídrico, de tal forma que pueda destinarse a otros usos que requieran un agua de mayor calidad. En algunos casos la reutilización puede considerarse como un tratamiento de afino de las aguas residuales depuradas, funcionando el binomio suelo-planta como un agente depurador del vertido. El riego con este tipo de aguas constituye una alternativa potencial a la descarga de las aguas efluentes a los ríos (Myers *et al.*, 1995).

Las zonas costeras del levante español se caracterizan por un clima especialmente caluroso y seco, donde prospera una agricultura puntera, basada sobre todo en cultivos en invernadero, bajo plástico y hortícolas no protegidos. Área en la cual las posibilidades de la reutilización de aguas residuales para el riego es amplia, tanto por sus necesidades como por la variedad de cultivos (Navarro, 1997). Valga como ejemplo, que el balance hidrológico anual medio de la cuenca del Segura establece para la fracción infiltrada un volumen de agua de 550 $\text{Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, equivalente a una precipitación de 29 mm y un 8% de coeficiente de escorrentía. Según estudios del grupo de trabajo del Segura la demanda total de agua para el año 2000 superará los 1500 $\text{Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, lo que supone un déficit anual superior a 700 $\text{Hm}^3 \text{ año}^{-1}$. Este

déficit tendrá que ser cubierto con aguas procedentes de otras cuencas, por la reutilización de aguas residuales procedentes de zonas urbanas o por la desalinización parcial del agua de mar. Estas dos últimas alternativas tienen el común de caracterizarse por ser aguas de baja calidad.

En este trabajo, primer lugar se introduce al lector en el conocimiento de las aguas residuales y sus problemas medioambientales, cómo están reguladas y que características las definen. Seguidamente, se plantea como posible solución o alternativa al vertido directo a los cauces o al mar, el aprovechamiento agrario y paisajístico de este tipo de agua de baja calidad. Continuamos, con las normas y prácticas de manejo que deben seguirse en los cultivos y sistemas de riego, de tal forma que se eviten riegos o impactos ambientales, ya que no debe olvidarse en ningún momento que se trata de gestionar un recurso parcialmente contaminado, ya que en la actualidad ningún proceso de depuración rentable garantiza eficiencias del cien por cien. Finalmente, se llegará a la conclusión que el problema medioambiental de las aguas residuales, tienen en el campo de la agricultura y del riego de zonas verdes solución, pero este resultado tiene efectos sinérgicos pues permite emplear menos agua de alta calidad para el riego, liberando parte de este recurso para otros usos más prioritarios.

La reutilización de aguas residuales en la agricultura y jardinería

La reutilización de aguas residuales en la agricultura no es un hecho nuevo. Más al contrario, se puede decir que se remonta a los inicios de la civilización. Aparece junto a las ciudades que poseían alcantarillado, aprovechando las aguas negras como abono para los campos de cultivo próximos. Incluso con anterioridad, igual que aún sucede en algunas zonas del oriente asiático, los campesinos aprovechan las aguas fecales, convenientemente procesadas, como fuente de abono para sus campos (Ableman, 1993), comunidades en las que la reutilización de recursos está maximizada. Sin embargo, el problema sanitario de este tipo de

aprovechamiento si es nuevo. Unido al hecho que las aguas no son ya exclusivamente negras, es decir procedentes de las deyecciones, sino que forman una amalgama de productos que son arrastrados hasta las depuradoras o a los cauces cuando estas no existen.

Desde mediados de este siglo se toma conciencia de la importancia de la gestión de las aguas por los Organismos Internacionales, desde los que se aboga por que el uso de las aguas deba realizarse en función de la calidad requerida en cada caso.

Posteriormente, el Consejo de Europa, en Estrasburgo el 6 de Mayo de 1968, proclama los Principios de la Carta Europea del Agua. Entre los que cabe destacar los puntos: segundo, que dice que *los recursos de agua dulce no son inagotables, y es imprescindible preservarlos, controlarlos y, si es posible, acrecentarlos*. Tercero: *Alterar la calidad del agua, significa perjudicar la vida del hombre y de los demás seres vivos que dependen de ella*. Cuarto: *La calidad del agua debe preservarse en niveles adaptados a la utilización a la que éste destinada y debe satisfacer las exigencias de la salud pública*. Quinto: *Cuando el agua, tras haber sido utilizada, sea devuelta a su medio natural, no debe poner en peligro los usos ulteriores, sean públicos o privados, a los que se destine*. Y noveno: *La conservación del agua implica un esfuerzo creciente de investigación científica, de formación de especialistas y de información pública*.

El agua residual, e incluso el agua procedente de una desalinización parcial, se caracteriza por ser un agua cuya calidad ha sido alterada (punto tercero de la citada Carta), y por tanto su posterior empleo se reduce a aquellos que admitan calidades inferiores (punto cuarto) y en todo caso no debe poner en peligro ninguno de estos nuevos usos (punto quinto). Finalmente, el trabajo que aquí se recoge hace referencia al punto nuevo, en la necesidad de divulgar e informar de este tipo de aprovechamiento alternativo.

Sin embargo, el tema de la reutilización de aguas residuales para el riego agrícola no es abordado en España hasta entrado los años noventa. Mientras zonas con una problemática similar a la nuestra como California o Israel, se iniciaron en la investigación de esta materia en los años setenta. Pero, es ante el problema de las sequías recurrentes y de las tensiones con las zonas cedentes de aguas, las que llevan a la necesidad de contar en el balance hidrológico con este tipo de agua, y muy especialmente en toda la costa Mediterránea española y en las Islas Canarias. Lugares en los cuales el agua es el principal factor limitante del desarrollo agrícola.

Los regadíos españoles consumen un 80% de la demanda total de agua. Y recalamos consumen, por que la agricultura es, en primer lugar, consumidora neta de agua. Es decir, del total de agua aplicada en riego del orden del 15 % supone la escorrentía profunda o drenaje, entre 0 y el 5% retorna a las corrientes superficiales, entre un 5 y 10% retorna a la atmósfera sin haber pasado por la planta, el resto retorna a la atmósfera por medio de la transpiración. Tan solo podrían ser aprovechables del orden del 15 al 20% (aguas de drenaje) del agua empleada en el riego. Estos valores medios se ven modificados en un sentido u otro en función tanto del sistema de riego como de la calidad inicial del agua. Es por ellos que el agua para reutilizar tenga principalmente una procedencia urbana (algo más del 15 % del consumo total de agua en España), puesto que el porcentaje de aguas industriales es bajo y en muchos procesos industriales ya cuentan con la reutilización del agua. En otros casos el empleo de la vegetación y el suelo como elementos filtrantes, caso por ejemplo de los filtros verdes, suponen cumplir simultáneamente dos objetivos. Por un lado, la depuración por medios naturales y de bajo costo de aguas residuales y, por otro, el aprovechamiento no alimentario que se puede obtener de esa producción vegetal, principalmente madera de chopos, pinos, eucaliptos, etc., o como biocombustibles.

Hay que señalar, en primer lugar que cuando se habla de reutilización de aguas residuales para el riego, debe entenderse por la aplicación directa de estas aguas. Es decir, conducir el agua que sale de la depuradora directamente al terreno de cultivo. Puesto que los reempleos indirectos son evidentes que se van a realizar aguas abajo del punto de vertido de las aguas residuales depuradas.

Tabla 1. Estimación de la evolución previsible de demandas hídricas

Cuencas	Demanda (Hm ³)		
	1992	2002	2012
Sur	1.163	1.351 (16 %)	1.492 (28 %)
Segura	1.861	2.045 (10 %)	2.145 (15 %)
Júcar	3.547	3.870 (9 %)	4.282 (21 %)
Total España	37.092	40.532 (9 %)	43.678 (18 %)

Fuente: Avance del Plan Hidrológico Nacional. Memoria (1993). Año base 1992.

Tabla 2. Aplicaciones del agua residual depurada

Aplicación	Observaciones
Riego agrícola	Se deben cumplir dos requisitos de calidad. Por un lado que el agua no afecte al desarrollo y crecimiento del cultivo. Y por otro lado que los productos obtenidos cumplan los requisitos necesarios para el destino que les sea propio, al tiempo que no ponga en peligro la salud de los trabajadores en contacto con este agua
Riego de zonas verdes	Debe evitarse el contacto directo del público con este tipo de aguas. Al tiempo que durante el riego deben evitarse las pérdidas por deriva
Reutilización recreativa y ambiental	En función del grado de exposición ha este tipo de agua los requisitos de salubridad serán más o menos intensos
Reutilización industrial	Este tipo de reutilización depende del tipo de proceso industrial al que se someta el agua. Variando enormemente el rango de calidades requerido que son específicos de cada industria
Recarga de acuíferos	La calidad exigida debe ser tan que se mantenga las calidades del acuífero a recargar y del usos que se le esté dando a este tipo de acuíferos. Importante papel juega el efecto depurador del suelo, el tiempo de permanencia y las condiciones de conservación
Destino no potable en zonas urbanas	Es un tipo de agua que en muchas ciudades ya se emplea para el baldeo de calles, lavado de coches, etc. En todo caso debe evitarse el contacto directo

Según el avance del Plan Hidrológico Nacional (1993), se prevé para el año 2012 un volumen de aguas reutilizadas en todo el Estado Español de $820 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. Las cuencas del Júcar y del Segura, indica dicho informe, engloban más de 615.252 hectáreas de regadíos, cerca del 20 por ciento del total nacional, zona que tiene unas necesidades de agua de 4.028 Hm^3 (el 17,5 por ciento de las necesidades totales), resultando un consumo medio de $6.547 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, un diez por ciento más bajo que la media española.

En la actualidad la costa de Levante viene reutilizando unos $80 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, incluido las aguas desaladas. Las previsiones es que esta demanda siga subiendo, primero a los $125 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$ para el año 2002 y hasta los 150 Hm^3 para el año 2012. valores que apenas llegan al 5 % de las demandas previstas, lo cual es de suponer que el volumen es insuficiente. No obstante la reutilización, si excluimos la procedentes de actividades agrícolas ya que estas se pueden reutilizar en la misma explotación, reduciendo el consumo de agua de ellas, va a ser principalmente a costa de aguas de procedencia urbana, y estas aguas en el mejor de los casos no llegan a mas del 15 % de las necesidades totales de la zona, es decir hablaríamos de unos $950 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, para unos consumos medios de $250 \text{ m}^3 \text{ habitante}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Excluyendo las pérdidas, consumos intermedios, etcétera, quedaría un volumen de aguas residuales urbanas depuradas próximas a $500 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, lo que permitirían regar unas 75.000 hectáreas de cultivos. Pero la costa de Levante presenta ventajas frente a otras a la hora de la reutilización de aguas para el riego, y es que el mayor consumo de agua en las zonas urbanas, debido al efecto del turismo, se produce durante los meses de verano, coincidiendo con las mayores necesidades de riego de los cultivos. Aspecto, clave para incentivar este tipo de uso del agua en esta región.

La reutilización de aguas residuales tiene una serie de claras ventajas sobre el medioambiente. Veamos algunas de ellas: Las aguas residuales una vez depuradas son vertidas

a un cauce, a pesar de que ningún proceso de depuración obtiene un rendimiento del 100%, siempre se produce un pequeño vertido que altera las condiciones naturales de ese cauce, incluso altera su ciclo hidrológico variando el caudal, si bien esta alteración tendrá una extensión limitada, la reutilización de este agua puede evitar estos efectos no deseables. Supone un uso más de un agua. Agua que además puede tener una calidad distintas a la que sería preciso obtener para no alterar el punto de vertido, compuestos como el nitrógeno, el fósforo o la propia materia orgánica pueden servir de propios fertilizantes, disminuyendo las necesidades de fertilizantes de origen químico. En suma se dispone de mayor recursos hídricos a la vez que se reducen los niveles de vertidos potencialmente contaminantes o alteradores del entorno. Téngase presente que el Protocolo de 17 de mayo de 1980 (B.O.E. de 26 de junio de 1974) aprobó el protocolo sobre la protección del mar Mediterráneo contra la contaminación de origen terrestre, en el que se incluyen los emisarios de aguas residuales al mar, de tal forma que se garantice la calidad de las aguas vertidas al mar, para estos casos la reutilización del agua residual puede ser una buena alternativa.

Aunque, el empleo de este tipos de agua no exime del riesgo sanitario al que se pueden ver expuestos el agricultor o productor y el consumidor final.

Pero el empleo de este tipo de aguas no está exento de otros problemas como son la salinidad y la sodicidad, la presencia de determinados metales pesados o la presencia de compuestos orgánicos, provocados por la adición directa de estas sales sobre el cultivo o suelo, o por su concentración a nivel de la planta o del suelo por su uso continuo pudiendo elevar los niveles de estas sustancias hasta hacerlos tóxicos.

Así, caracterizar correctamente el agua residual y a partir de aquí gestionar adecuadamente el riego para que esos problemas nunca aparezcan son la base del manejo de aguas residuales, estableciendo el equilibrio entre los compuestos del agua residual y del suelo.

Este trabajo tiene como objetivos: a) analizar el interés que tiene la reutilización de aguas residuales tanto para la conservación del medio ambiente como para la agricultura; b) aportar soluciones a los problemas técnicos y sanitarios que causa el empleo de estas aguas y c) recomendar los sistemas de cultivo y manejo más adecuados para alcanzar estos fines.

2. TIPIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Por **agua residual** se entiende el agua que han sido utilizada al menos una vez, y después de este aprovechamiento se las devuelve a su cauce. Proceden de un agua natural que se ha empleado para un uso determinado, y en consecuencia han adquirido una serie de sustancias y elementos extraños, en mayor o menor proporción, según el uso dado. Estas sustancias han alterado sus características físicas, químicas o biológicas. Las aguas residuales se llaman **vertidos** cuando se descargan directamente al medio natural, generalmente a cauces o masas de agua continentales o marinas. Se habla de **aguas residuales depuradas** a aquellas aguas residuales que previamente a su vertido en un cauce han pasado por un proceso de depuración, con el que se pretende eliminar, en el mayor grado posible, esas sustancias extrañas o aquellas que están por encima de los rangos permitidos para su retorno a los flujos naturales. El retorno de estas aguas al cauce al mar genera un impacto en el punto de retorno, pues siempre incorpora sustancias extrañas al cauce, cuando no calidades muy distintas a las de ese cauce o genera regímenes de circulación diferentes a los ecológicos.

Clasificación de las aguas residuales

La presencia de sustancias extrañas o contaminantes en este tipo de aguas, depende principalmente del tipo de uso dado, y por tanto se pueden clasificar en función de este origen:

- **Aguas residuales urbanas:** tienen su origen en las áreas urbanas, zonas residenciales, instalaciones comerciales, públicas y similares. El volumen de vertido diario o caudal y carga, es decir el contenido en sustancias contaminantes (Tabla 3), tienen diariamente un carácter permanente, existiendo variaciones horarias. Cuando la zona residencial se caracteriza por la presencia de segunda vivienda o en localidades eminentemente turísticas, tanto el caudal como la carga sufre importantes variaciones estacionales (Figura 1). Uno de los grandes problemas de este tipo de aguas es que no están ausentes los vertidos industriales, de industrias que descargan sus aguas a la red de saneamiento municipal, este tipo de vertidos incrementa el número de sustancias extrañas y la dificultad de su caracterización, a no ser que se conozcan con exactitud todos los tipos de empresas industriales que vierten sus aguas residuales a la red de alcantarillado. Dentro de ellas se pueden diferenciar:

- *Aguas domiciliarias:* son las aguas resultantes de la evacuación de los residuos y manipulaciones de cocinas (desperdicios, arenas de lavado, residuos animales y vegetales, detergentes, materias grasas y partículas), los lavados domésticos (jabones, detergentes sintéticos con espumantes, sales, etc.) y de la actividad general de la viviendas (celulosa, almidón, glucógeno, insecticidas, partículas orgánicas, etc.) y que se recogen en la limpieza de la habitación humana.

- *Aguas negras procedentes de la defecación del ser humano,* caracterizadas por el alto contenido en materia orgánica, urea, cloruros, fosfatos y sulfatos, arrastrando microorganismos patógenos, principalmente bacterias y virus, en grandes cantidades, pueden ser foco de transmisión de enfermedades.

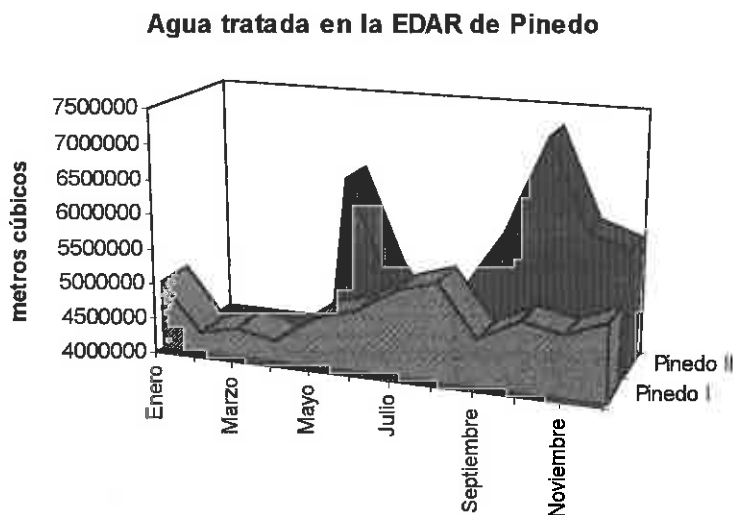


Figura 1. Evolución anual del agua depurada (1994).

- *Aguas de limpieza pública y riego*, en ellas destaca la presencia de arenas, materias sólidas, materia en suspensión, materia orgánica, nitrógeno, fosfatos, cenizas, metales pesados (plomo principalmente, como resultado de la combustión de carburantes), hidrocarburos, pesticidas, etc.
- *Infiltraciones en la red*: constituyen el agua del subsuelo que penetra en la red de saneamiento a través de tuberías en mal estado, juntas, conexiones defectuosas y paredes de los pozos de registro. Este agua es una componente variable en las aguas residuales urbanas, esta en función de las precipitaciones. También, dependen de la calidad de los materiales y la ejecución de la red, del tipo de mantenimiento, y de la elevación del nivel freático comparado con el de las alcantarillas, y de la antigüedad y estado de conservación.
- **Aguas pluviales, de drenaje y escorrentía urbana**: Son las causadas por las precipitaciones que tienen lugar sobre un núcleo urbano. En general las aguas de drenaje son recogidas por la

misma red que las aguas residuales urbanas (es lo que se llama red unitaria), existiendo en algunas urbanizaciones una red específica para ellas (red separativa). Tienen un carácter intermitente pero con gran caudal instantáneo, mayor en las zonas con lluvias de tipo torrencial, como sucede en la costa levantina. Tienen, además la peculiaridad de que cuando se presentan los sistemas de depuración convencionales son incapaces de tratar tanta cantidad de agua que es vertida directamente al cauce, aunque se haya mezclado con las aguas residuales urbanas. Se distinguen tres fuentes de contaminación que afectan a la cantidad y calidad de la escorrentía: la contaminación natural, ligada a las superficies no urbanizadas, la contaminación atmosférica y la contaminación ligada a las actividades humanas, dada en gran medida en las superficies impermeables urbanas. La lluvia en su caída incorpora elementos que están en suspensión en la atmósfera, así como arrastran las partículas y fluidos presentes en las superficies expuestas: hollín, polvo de ladrillo y cemento, esporas y polvo orgánico e inorgánico de los tejados, partículas sólidas, polvo, hidrocarburos de las vías públicas, metales pesados, pesticidas, restos de vegetales y animales y partículas sólidas (tierras) de los parques y zonas verdes. La primera lluvia después de un tiempo seco suele tener un gran carga contaminante, que hay que tratar. Uno de los principales problemas de este tipo de aguas es el arrastre de compuestos orgánicos, sobre todo restos vegetales, y tierras que en muchos casos obturan la red de evacuación o reducen su capacidad, generando problemas de evacuación. El tratamiento depurador de estas aguas es difícil, sobre todo si se trata de redes unitarias. Por, ello en los nuevos núcleos es aconsejable la construcción de redes separativas, y prever tratamientos de bajo coste para estas aguas, entre los que la aplicación de estas aguas para el riego, como proceso de depuración, es decir como filtro verde, es la alternativa más adecuada, mediante el diseño y construcción de zonas verdes forestales que en determinados momentos se puedan inundar y admitan grandes volúmenes de agua, regulando así el vertido al cauce.

- **Aguas residuales industriales:** Sus características dependen del tipo, tamaño y procesos productivos que tenga la industria. La auditoría ambiental de las industrias, los controles de calidad, así como la aplicación de las normas ISO 9000, y en general la adecuación ambiental de la actividad están permitiendo reducir la carga contaminante que generan. Los vertidos pueden ser continuos o discontinuos, además pueden existir puntas importantes de caudal y/o carga contaminante. En algunos casos, como en las industrias agroalimentarias dependientes de productos estacionales, como las conserveras, pueden tener importantes variaciones estacionales según el proceso productivo. Cuando la industria se localiza dentro de una zona urbana, las aguas residuales que genera se incorporan a la misma red de saneamiento que las urbanas. Aunque, en algunos casos es obligatorio un tratamiento previo para su vertido a la red de saneamiento municipal. Dentro de las aguas residuales industriales se pueden diferenciar:

- *Líquidos residuales:* son los que provienen de la fabricación propia de los productos. Se consideran como subproductos del proceso. Lo ideal sería realizar un tratamiento de recuperación, ya que para muchos de ellos es inviable económicamente su depuración, por ejemplo los sueros de queserías o industrias lácteas.
- *Aguas residuales de proceso:* son las que se originan durante el uso del agua como un medio auxiliar en el proceso de fabricación, ya sea para transporte, lavado, refrigeración directa, etc.
- *Aguas de refrigeración indirecta:* son aguas que no han entrado en contacto directo con el producto o con su proceso de elaboración. De esta forma la única carga contaminante que adquieren es su temperatura, generalmente no se vierten y se reciclan en la planta.

Tabla 3. Composición característica de un agua residual urbana

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN TÍPICA	VALOR MÁXIMO ⁽¹⁾
Sólidos totales	350-1200 mg L ⁻¹	-
Sólidos en suspensión	100-400 mg L ⁻¹	1000 mg L ⁻¹
Sólidos disueltos	250-850 mg L ⁻¹	-
Sólidos sedimentables	5- 20 mL L ⁻¹	-
DBO ₅ , a 20°C	110-500 mg L ⁻¹	1000 mg L ⁻¹
DQO	250-1000 mg L ⁻¹	1750 mg L ⁻¹
Carbono orgánico total (COT)	80-290 mg L ⁻¹	-
Aceites y grasas	0-50 mg L ⁻¹	100 mg L ⁻¹
Nitrógeno total	20-85 mg L ⁻¹	-
Nitrógeno amoniacal	12-50 mg L ⁻¹	-
Nitratos/Nitritos	0 mg L ⁻¹	-
Fósforo total (P _t)	4-15 mg L ⁻¹	-
P orgánico	1-5 mg L ⁻¹	-
P inorgánico	3-10 mg L ⁻¹	-
Arsénico	< 0.1 mg L ⁻¹	< 1 mg L ⁻¹
Bario	< 5 mg L ⁻¹	20 mg L ⁻¹
Boro	< 1 mg L ⁻¹	3 mg L ⁻¹
Cadmio	< 0.02 mg L ⁻¹	0.5 mg L ⁻¹
Cianuros	< 0.02 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹
Zinc	0.4-0.7 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹
Cobre	0.2- 0.5 mg L ⁻¹	3 mg L ⁻¹
Cromo	0.1- 0.5 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹
Estaño	< 0.02 mg L ⁻¹	2 mg L ⁻¹
Hierro	< 1 mg L ⁻¹	10 mg L ⁻¹
Mercurio	< 0.02 mg L ⁻¹	0.1 mg L ⁻¹
Manganeso	< 0.02 mg L ⁻¹	2 mg L ⁻¹
Níquel	< 0.02 mg L ⁻¹	10 mg L ⁻¹
Plata	< 0.02 mg L ⁻¹	0.1 mg L ⁻¹
Plomo	0.08-0.4 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
Selenio	< 0.02 mg L ⁻¹	1 mg L ⁻¹
Cloruros	30-100 mg L ⁻¹	-
Fluoruros	< 10 mg L ⁻¹	15 mg L ⁻¹
Sulfuros	< 1 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹
Fenoles	< 1 mg L ⁻¹	2 mg L ⁻¹
Grasas	50-200 mg L ⁻¹	-
Alcalinidad (como CaCO ₃)	50-200 mg L ⁻¹	-
Virus totales	10 ³ -10 ⁶ nº de colonias /l	-
Streptococos fecales	0.2-1.5 x 10 ⁶ /100 ml	-
Coliformes totales	3-40 x 10 ⁷ /100 ml	-
Coliformes fecales	2-50 x 10 ⁶ /100 ml	-
Bacterias fecales	1-40 x 10 ⁸ /100 ml	-

(1) Valores máximos instantáneos establecidos en la Ley de vertidos industriales de la Comunidad de Madrid, Ley 10/1993 (B.O. nº 269, de 12 de noviembre de 1993), también establece una conductividad máxima de 5000 μScm^{-1} , temperatura < 40°C, pH 6-9 unidades, toxicidad 25 Equitox m⁻³.

Las aguas residuales industriales son específicas de cada industria. Siendo definida cada una de ellas por unos contaminantes muy específicos que dependen del proceso productivo. Conocer con exactitud todo el proceso productivo permite caracterizar este tipo de aguas

desde el proyecto mismo de la industria con lo cual se facilita el diseño del sistema depurados más conveniente para cada caso, incluso determinar si existe o no la tecnología suficiente para tratar este tipo de agua. De esta forma, cuando se conoce el origen del vertido, el número de parámetros que definen la carga contaminante es reducido. No obstante, existe una gran variabilidad de situaciones, siendo la forma correcta caracterizar los vertidos para cada caso en concreto. Si se desconoce los resultados del proceso productivo sobre la calidad del agua, no habrá más remedio que cuando esté en funcionamiento la industria analizar convenientemente el agua residual que se produce.

Cuando se trata de grandes industrias, conviene el tratamiento específico del agua residual y evitar su mezcla con las aguas residuales de otra procedencia, ya que dificultaría el tratamiento final. Desde un punto de vista del aprovechamiento agrario de estas aguas, la presencia de grandes cantidades de compuestos metálicos u otras sustancias similares impiden su empleo directo.

Tabla 4. Características medias del vertido de industrias agroalimentarias

SUSTANCIA	Unidades	CONCENTRACIÓN
Sólidos en suspensión	mg/l	50-2000
DBO ₅ , a 20°C	mg/l	1000-15000
pH	-	4 - 9

Un caso particular son las industrias agroalimentarias. Éstas suelen tener presentar un elevado contenido en materia orgánica, sólidos (disueltos o en suspensión), grasas.

- **Aguas residuales en explotaciones ganaderas:** compuestas por las defecaciones de los animales y sus aguas de limpieza. Tienen un alto contenido en materia orgánica y metabolitos del animal. Pueden incluir residuos de antibióticos u otros medicamentos, aunque también su composición depende del tipo de alimentación a que se somete a los animales y las condiciones de estrés que puedan sufrir los animales. Los vertidos más corrientes son los

purines procedentes de las granjas y cebaderos de porcino, de uso extendido como abono orgánico en las explotaciones agrícolas por el alto contenido en sustancias orgánicas preocupantes por la alta carga orgánica y su concentración son los purines de las. Los lixiviados de estercoleros, sobre todo en zonas húmedas pueden crear fuentes puntuales de contaminación.

Tabla 5. Composición media típica del vertido de industrias conserveras.

PRODUCTO	DBO ₅ (mg/l)	SS (mg/l)
Espárrago	100	30
Judías verdes	160 - 600	60- 85
Remolacha	1580 -5480	720 - 2188
Zanahorias	520 - 3030	1830
Maíz	1123 - 6025	300 - 4000
Guisantes	380 - 4700	272 - 400
Champiñón	76 - 390	50 - 242
Espinacas	280 - 730	90 - 580
Melocotón	200 - 1020	260
Tomates	178 - 3880	170 -1168

- **Aguas de drenaje agrícola:** Son las aguas sobrantes del riego que son recogidas por la red de drenaje. En muchas zonas su reutilización para riego forma parte de la técnica tradicional de riego, por ejemplo en los arrozales. También, en muchos cultivos sin suelo y cuando la disponibilidad del agua escasea, su reutilización para el riego es común mientras la conductividad eléctrica o el contenido de sales no perjudique al crecimiento y producción de las plantas cultivadas. Son aguas de composición variable, ésta depende de numerosos factores, tales como: cultivo, tipo de suelo, técnica y frecuencia del riego, fertilización y tratamientos del cultivo. De forma general se puede decir que se caracterizan por un alto contenido en sales, arrastre de fertilizantes, sobre todo nitrógeno y fósforo, fitosanitarios y herbicidas. Son las aguas más simples de tratar ya que muchas veces con una filtración conseguimos un agua de calidad aceptable para ser reutilizada.

Tabla 6. Composición típica de los vertidos de un explotación de porcino intensiva

SUSTANCIA		PURIN SIN DEPURAR	PURIN DEPURADO
Sólidos en suspensión	mg L ⁻¹	20240	100
Conductividad	μS cm ⁻¹	14560	11150
pH	-	7.5 - 8	8 - 8.2
DQO	mg O ₂ L ⁻¹	17550	1070
Nitrógeno total	mg L ⁻¹	2588	1281
N - NO ₃	mg L ⁻¹	663	7
N - NH ₄	mg L ⁻¹	19256	1274
Fosfatos	mg L ⁻¹	879	25
Sodio	mg L ⁻¹	363	305
Magnesio	mg L ⁻¹	592.8	29
Calcio	mg L ⁻¹	1436	89
Potasio	mg L ⁻¹	1621	1067
Cloruros	mg L ⁻¹	1070.6	717
Carbonatos	mg L ⁻¹	524	5
Bicarbonatos	mg L ⁻¹	11380	6971
Cobre	mg kg ⁻¹	10	2.5
Streptococos fecales	1/100 ml	5600000	2360
Coliformes totales	1/100 ml	6900000	1890
Coliformes fecales	1/100 ml	2800000	360

Fuente: SELCO, 1995 y Fernández *et al.* 1995.

- **Aguas residuales de actividades extractivas:** Proceden de la limpieza, separación y proceso que se somete la extracción de áridos, minerales y otros elementos. La carga contaminante es alta y específica. Es decir, se caracterizan por concentran una gran cantidad de elementos o sustancias simples, que son las que se quieren separar o retirar de la materia prima buscada. En el caso de explotaciones de áridos o graveras, suelen ser tierras más o menos finas, arenas, limos y arcillas, el empleo de estas aguas requiere una filtración o decantación previa, no presentando ningún otro problema adicional, salvo casos concretos de impurezas u otros elementos extraños que hubiere en la cantera. El uso más adecuado es su reutilización en el propio proceso de extracción, aunque es corriente que estas aguas contribuyan a la restauración y recuperación de zonas húmedas anejas a este tipo de explotaciones, más que al riego. El uso directo de estas aguas para el riego sobre todo de choperas, puede causar por acumulación la aparición de un capa de tierra impermeabilizante, reduciéndose las tasas de infiltración y el aprovechamiento de este agua.

Normas para el muestreo de aguas residuales

Las muestras a tomar del agua residual que se quiere analizar, debe ser representativa del conjunto, tanto en el espacio como en el tiempo. Habrá que determinar primero los **puntos de muestreo, el tiempo de muestreo y la frecuencia.**

Determinado los puntos de muestreos, en cada uno de ellos se tomará una muestra representativa, que puede formarse con la mezcla de varias submuestras, cuyo número estará en función de la homogeneidad que presente el medio en las que se toma.

El volumen de cada una de las muestras está condicionado por el número de parámetros a analizar. Parámetros que habrá que definir, previamente, en función de las características del agua residual, de los cultivos a regar, del tipo de suelo, del sistema de riego y del manejo; los cuales se indicarán al laboratorio que vaya a efectuar la analítica.

En general, es suficiente tomar muestras de dos a cuatro litros, para cada uno de los puntos de muestreos considerados y se repetirán en función de la frecuencia de muestreo. Irán en un recipiente esterilizado, indispensables si se van a realizar análisis microbiológicos. Es muy importante mantener las condiciones de la muestra durante el transporte y almacenamiento antes de entregarlas en el laboratorio para efectuar el correspondiente análisis, mantener una temperatura constante, en refrigeración, y en ausencia de luz.

Los puntos de muestreo deben ser como mínimo: la salida del efluente en la depuradora o del colector, entrada y salida del proceso previo de depuración, salida en campo, aguas de drenaje o escorrentía, en depósitos y balsas de almacenamiento, etcétera. Debe realizarse con muestras simples a lo largo del tiempo o muestreo cronológico, tanto diarios o muy frecuentes y estacionales, para conocer su evolución a lo largo del ciclo productivo del cultivo a regar.

La selección de los métodos analíticos a aplicar dependerá de los parámetros a estudiar y de consideraciones, tales como, concentración estimada en la muestra, exactitud y precisión requeridas en los resultados, del número de análisis a realizar, del tiempo empleado para su obtención. Además se velará por cumplir las normas establecidas para los parámetros considerados. Se pueden seguir como indicativas las normas UNE establecidas para el análisis de aguas potables.

3. NORMAS PARA EL EMPLEO DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS EN EL RIEGO DE CULTIVOS.

El marco regulador del empleo de aguas residuales lo encontramos en la Ley 29/1985, de 2 de Agosto, de aguas. El artículo 101 recoge que el Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización directa de las aguas, en función de los procesos de depuración, su calidad y los usos previstos. Esta Ley define la reutilización de aguas depuradas como *un aprovechamiento diferente del primer uso en caso que se lleve a cabo por persona distinta del primer usuario de las aguas, y deberá por tanto ser objeto de concesión distinta*. Es decir, en general el aprovechamiento de aguas residuales depuradas requiere la concesión administrativa, aunque el primer usuario de ese agua, al disponer de concesión para el primer uso, tiene la posibilidad de aprovecharla en un uso posterior.

El desarrollo de esta Ley mediante el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (R.D. 849/1986 de 11 de Abril) en sus artículos 272 y 273 recoge la reutilización de aguas. Define la reutilización directa de aguas como aquella utilización que se produce cuando habiendo sido ya utilizadas por quien las derivó inicialmente y antes de su devolución al cauce

público, fueran aplicadas a otros diferentes usos sucesivos. Para la reutilización de aguas residuales es necesaria la concesión administrativa e informe de las autoridades sanitarias, que tendrá carácter vinculante para el organismo de Cuenca que decida sobre la concesión. El Reglamento prohíbe expresamente la reutilización directa de aguas residuales depuradas para el consumo humano excepto en situaciones catastróficas o de emergencia.

En la memoria del Plan Hidrológico Nacional (1993) ya se contempla la reutilización de las aguas residuales una vez depuradas. Diferencia entre los distintos usos que puede tener como son el riego de parques, jardines, zonas deportivas, refrigeración y otros usos industriales, recargas de acuíferos y riego de determinados cultivos. En el balance anual de recursos hidráulicos y demandas para 1992 la distribución de recursos reutilizados era la siguiente: en la Cuenca del Segura ($42 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$), Júcar ($32 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$), Baleares ($12 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$) y Canarias ($10 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$). Las previsiones realizadas para el año 2002, suman un total de $445 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$ de aguas residuales depuradas reutilizadas y para el año 2012 un total $595 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, al poco tiempo se cambiaron las previsiones y se elevó la cantidad de agua reutilizada a $820 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$, siendo las cuencas hidrográficas con mayor reuso: Canarias ($130 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$), Júcar ($110 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$), Segura ($100 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$), Cuencas internas de Cataluña ($100 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$) y Ebro ($90 \text{ Hm}^3 \text{ año}^{-1}$). No obstante, para estos usos deberán extremarse los mecanismos de control del contenido de sales en el agua, los efectos que su empleo puede causar sobre el suelo y, añade, que estos usos estarán en función de las tecnologías que se dispongan para reducir la carga contaminante del agua residual. No obstante, el tope de la reutilización vendría dado por el consumo de agua en las zonas urbanas, destinándose en el mejor de los casos no más del ochenta por ciento de este consumo a la reutilización.

Por otra parte, el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas residuales (17 de febrero de 1995) tiene entre sus objetivos y líneas de actuación futuras un Plan Nacional de Reutilización de las Aguas Residuales. El objetivo de este Plan es obtener una utilización más eficiente del recurso, definir medidas normativas y financieras para fomentar la reutilización de aguas residuales. En él se recogen una serie de obras declaradas de interés general, algunas ya en marcha. Destaca, la reutilización de aguas residuales del Campo de Dalías en Almería, saneamiento y reutilización en la bahía de Palma, obras de reutilización en Canarias, depuración y reutilización por recarga del Bajo Llobregat (Barcelona) y obras de reutilización de aguas residuales en Marina Baja y Vinalopó en la provincia de Alicante.

También, el Plan Nacional de Regadíos fija la reutilización del agua residual depurada como una de las actuaciones propuestas para la mejora de dotaciones y garantía de suministro. Además de contemplarse el empleo de nuevos recursos a partir del agua residual depurada dentro de los Planes de emergencia en situaciones de sequía. Finalmente dentro de los programas de Actuación del plan se encuentra el Subprograma 53, que promueve el Plan de Riego y Desarrollo Comarcal con aguas residuales.

Desde el punto de vista de la Unión Europea, tenemos la Directiva del Consejo del 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (91/271/CEE). Transpuesta por el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, y el Real Decreto 509/1996, de 25 de marzo que desarrolla el anterior, entre otras cosas determinan los parámetros de calidad de salida de las aguas depuradas. Es por ello que si el riego se va a realizar con aguas depuradas el mínimo de calidad del agua es el fijado en estos reales decretos, independientemente de la calidad requerida por el cultivo y suelo para el riego.

Fijan las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, cuyos tratamientos serán obligatorios a partir del año 2005.

Según estas normas se considera una aglomeración urbana la zona cuya población y/o actividades económicas presenten concentración suficiente para la recogida y conducción de las aguas residuales urbanas a una instalación de tratamiento o punto de vertido final. Se define como habitante equivalente (h.e.) a la carga orgánica biodegradable que presenta una demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO_5) de 60 g de oxígeno por día. Se distinguen dos tipos de área urbanas:

1) **Aglomeración urbana tipo A o industria asimilada:** Son aquellas en las cuales las aguas residuales depuradas procederán de aglomeraciones urbanas o industrias que representen: más de 10.000 h.e. o más de 2.000 h.e. para los vertidos en aguas dulces o estuarios. Sus aguas residuales serán sometidas al menos a un tratamiento secundario o un proceso equivalente. Los efluentes de aguas residuales cumplirán al menos los siguientes requisitos:

Tabla 7. Criterios de calidad que tiene que cumplir los efluentes de las estaciones depuradoras de aglomeraciones tipo A.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción ⁽¹⁾
DBO_5 (a 20°C) ⁽²⁾	25 mg/l O_2	70-90 %
DQO	125 mg/l O_2	75 %
SST ⁽³⁾	35 mg/l	90 %
Fósforo total ⁽⁴⁾	2 mg/l para 10.000-100.000 h.e. 1 mg/l para > 100.000 h.e.	80%
Nitrógeno total ⁽⁴⁾	15 mg/l para 10.000-100.000 h.e. 10 mg/l para > 100.000 h.e.	70-80 %

⁽¹⁾ Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada

⁽²⁾ Este parámetro puede sustituirse por el carbono orgánico total (COT) o por el oxígeno disuelto total (DOT), si se establece correlación con el sustituido.

⁽³⁾ Este requisito es optativo

⁽⁴⁾ Requisitos para los vertidos en zonas sensibles

2) **Aglomeración urbana tipo B o industria asimilada:** Cuando las aguas residuales depuradas proceden de aglomeraciones urbanas o industrias que representen:

- Menos de 10.000 h.e., sus aguas residuales deberán recibir un tratamiento adecuado.
- Menos de 2.000 h.e. y los vertidos se hagan en aguas dulces o estuarios, sus aguas residuales deberán recibir un tratamiento adecuado.
- Entre 150.000 y 10.000 h.e. para los vertidos en zonas definidas menos sensibles, sus aguas residuales deberán recibir un tratamiento primario.
- Entre 2.000-10.000 h.e. vertidos en estuarios definidos zona menos sensible, sus aguas residuales deberán recibir un tratamiento primario.
- Menos de 2.000 h.e. para los vertidos en estuarios definidos zona menos sensible, sus aguas residuales deberán recibir un tratamiento adecuado.

Los niveles de calidad son: para el *tratamiento primario* aquel en el que mediante un proceso físico y/o químico se reduzca la DBO_5 por lo menos en un 20% y el total de sólidos en suspensión en un 50 %. El *tratamiento adecuado* aquel sistema de eliminación en virtud del cual, después del vertido a cauce de las aguas residuales, las aguas receptoras cumplen los objetivos de calidad y las disposiciones pertinentes conforme las Directivas Comunitarias, es decir puede ser desde un simple tratamiento primario hasta un terciario, depende de las características de calidad del efluente.

Puede que para la reutilización sea necesario un tratamiento de afino del efluente depurado o que se considere la reutilización como sistema de depuración de las aguas residuales, siempre habiendo sido sometidas éstas a un pretratamiento. Este tipo de regulación, de obligado cumplimiento, permite dividir el proceso de decisión sobre la reutilización de estas aguas en el riego en dos grandes grupos uno como tratamiento de depuración adicional y otro para la utilización de un agua ya depurada de características determinados por unos valores admisibles (Galán y Hernández, 1997).

Estas nuevas regulaciones son las que han causado que la Ley 2/1992 de 26 de marzo de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (D.O.G.V. 1761 de 8 de abril de 1992) haya sido modificado sucesivamente por los Decretos 74/92 (D.O.G.V. 1780 de 12 de mayo de 1992), 170/92 (D.O.G.V. 1955 de 26 de octubre de 1992), 8/93 y 9/93 (D.O.G.V. 1955 de 2 de febrero de 1993), 18/93 (D.O.G.V. 1964 de 15 de febrero de 1993), 97/95 (D.O.G.V. 2517 de 29 de mayo de 1995), y las Órdenes 1.04.93 (D.O.G.V. 2001 de 8 de abril de 1993) y de 5.04.93 (D.O.G.V. 2003 de 14 de abril de 1993), en las que se recogen principalmente las normas a seguir en la depuración de aguas y la calidad del agua exigida en los vertidos realizados en el ámbito de esta Comunidad Autónoma. No obstante, la Ley 7/1986 (D.O. nº 493, de 24 de diciembre de 1986) regula en esta Comunidad Autónoma la utilización de aguas para el riego, a través de los planes de riego, mecanismos desde los cuales se puede articular la reutilización de aguas residuales para el riego, aunque no se especifica nada acerca del uso de este tipo particular de agua si se fomenta la utilización adecuada del agua.

De todas formas, a nivel estatal no está regulada la materia sobre utilización agraria de las aguas residuales urbanas. No obstante, si existen recomendaciones a nivel de organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (1989). O en otros países o estados como los criterios de calidad y tratamiento del estado de California (Tabla 8), que se caracterizan por un máximo rigor en las condiciones exigidas, e incorporadas esencialmente en las directrices propuestas por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1992) (Tabla 9), que se encuentran en un punto intermedio de exigencias entre las citadas anteriormente.

Tanto por similitud de clima y agricultura, además de por el rigor en la elaboración de la norma, si hay que tomar un patrón, este debe ser el seguido por la legislación del estado de California. Pues se trata de la más restrictiva, realizada en un país desarrollado, pero lo que es

más relevante en un estado que por su climatología, pertenece al dominio climático mediterráneo, tiene unas características similares a las españolas incluidos sus sistemas agrarios, donde abundan los cultivos hortícolas e intensivos.

Tabla 8. Criterios de calidad y de tratamiento del agua residual para reutilización en riego del Estado de California (CDOHS, 1978).

TIPO DE USO	Concentración de Coliformes totales	Tratamiento de depuración requerido
Cultivos para producción de semillas de siembra, para producir heno para el ganado y cultivos industriales. Riego superficial de árboles frutales y viñedos	- - -	Primario
Pastos para ganado productor de leche. Lagos ornamentales. Riego de jardinería, como campos de golf, cementerios, etc.	$\leq 23/100$ mL	Oxidación Desinfección
Riego superficial de cultivos comestibles ^a . Lagos de uso recreativo con restricciones de uso.	$\leq 2.2/100$ mL	Oxidación Desinfección
Riego por aspersión de cultivos comestibles ^a . Riego de jardinería, como parques de recreo, jardines, etc. Riego de lagos recreativos sin restricciones de uso.	$\leq 2.2/100$ mL	Oxidación Coagulación Clarificación Filtración ^b Desinfección

^a Pueden hacerse excepciones para cultivos que no se consuman en crudo.

^b La turbidez del efluente filtrado no puede sobrepasar una media de 2 unidades de turbidez durante ningún periodo de 24 horas.

Las normas que se siguen a la hora del empleo de aguas residuales para el riego agrícola son las que siguen:

- El riego con agua residual sin depurar deberá considerarse como un tratamiento del agua residual y por tanto los cultivos no se destinarán directa o indirectamente al consumo humano. Este tipo de aprovechamiento es lo que se viene llamado como depuración mediante Filtros Verdes.
- Existe una estrecha relación entre el tipo o calidad del agua residual depurada, el tipo de cultivo y el sistema de riego, en función de los riesgos sanitarios asociados a cada uno de ellos.

A menor calidad del agua depurada el contacto entre el agua y la persona debe ser el mínimo posible, se trata de evitar que este se produzca.

Tabla 9. Normas de calidad que debe cumplir el agua residual depurada para su aplicación en el riego que se indica, conforme a los tratamientos de depuración exigibles (USEPA, 1992).

TIPO DE REUTILIZACIÓN	TRATAMIENTO	CALIDAD DEL AGUA
Riego de césped y plantas ornamentales con contacto directo (parques públicos, campos de golf, cementerios, etc.). Reutilización para sistemas contraincendios, limpieza de vehículos, aire acondicionado y otros usos con un contacto similar con el agua	Secundario Filtración Desinfección	pH: 6-9 ^a ≤ 10 mg L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 2 NTU No detectable coli fecal /100 ml Cl ₂ residual > 1 mg L ⁻¹
Riego de césped, zonas arbóreas, y otras áreas donde el acceso del público está prohibido, restringido o es infrecuente.	Secundario Desinfección	pH: 6-9 ^b ≤ 30 mg L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 30 mg L ⁻¹ SS ≤ 200 Coli fecal /100 ml Cl ₂ residual > 1 mg L ⁻¹
Riego superficial o por aspersión de cualquier tipo de cultivo comestible no procesado para su comercialización, incluso para consumir en crudo.	Secundario Filtración Desinfección	pH: 6-9 ^a ≤ 10 mg L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 2 NTU No detectable coli fecal /100 ml Cl ₂ residual > 1 mg L ⁻¹
Riego de cultivos procesados para su comercialización (implica que los patógenos han sido destruidos por medios físicos o químicos) Riego superficial de frutales y viñas.	Secundario Desinfección	pH: 6-9 ^b ≤ 30 mg L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 30 mg L ⁻¹ SS ≤ 200 Coli fecal /100 ml Cl ₂ residual > 1 mg L ⁻¹
Riego de pastos para ganado de leche. Riego de cereales, cultivos industriales, forraje, pastos.	Secundario Desinfección	pH: 6-9 ^b ≤ 30 mg L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 30 mg L ⁻¹ SS ≤ 200 Coli fecal /100 ml Cl ₂ residual > 1 mg L ⁻¹

Cloro residual total después de un tiempo de contacto mínimo de 30 minutos.

Se establece un área de seguridad para proteger los pozos de agua potable de la contaminación, así como evitar riesgos sanitarios a la población por el contacto con agua regenerada, siendo la distancia mínima admisible de:

^a 15 metros a pozos de agua potable,

^b 90 metros a pozos de agua potable y 30 m a áreas accesibles al público (si se riega con aspersión).

- Es necesario caracterizar correctamente el agua residual, todos sus parámetros y especialmente los sanitarios, que son los que desde un punto de vista normativo regulan su

empleo. En primer lugar, debe distinguirse su origen: urbano o industrial. Este tipo de regulación es básicamente sanitario, y no tiene en cuenta las relaciones que puedan darse entre esa calidad del agua, el cultivo y el suelo.

No obstante, algunas Comunidades Autónomas ya tiene regulada la reutilización de las aguas residuales depuradas. Estas Comunidades Autónomas son las de Baleares, Andalucía y Cataluña. La legislación autónoma de Islas Baleares (Decreto 13/1992 de 13 de febrero) está basado en la Directiva 91/271/CEE en cuanto a los parámetros de depuración y en la normativa de la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) para los requisitos sanitarios. Los textos elaborados por la Consejería de Sanidad de la Junta de Andalucía (1994) y por el Departamento de Sanidad de la *Generalitat de Catalunya* (1994) adoptan básicamente las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud para agua de riego agrícola y hacen más restrictivas las condiciones sanitarias de las aguas residuales depuradas destinadas al riego de campos de golf (los coliformes fecales deben estar en una concentración inferior a 200/100 mL y contener menos de un huevo de helminto por litro), ya que son este tipo de riegos los que actualmente están empleando aguas residuales depuradas. No obstante, es recomendable guiarse por los niveles de calidad exigidos en las normas de California, antes expuestas, ya que son más restrictivas y por tanto más seguras.

4. CALIDADES EXIGIBLES AL AGUA RESIDUAL DEPURADA PARA SU EMPLEO EN EL RIEGO AGRÍCOLA.

No existe un único valor de calidad para el agua de riego, a diferencia de lo que ocurre con el agua potable. Esto se debe a que los cultivos en función de sus zonas de origen se han adaptado al aprovechamiento de aguas y suelos de muy diferentes tipos y características. Se

puede decir que hay tantas calidades como combinaciones de cultivos y suelos se puedan realizar. Es más la adaptación de las distintas especies vegetales a determinadas condiciones ambientales, como pueden ser suelos salinos, hace que exista una vegetación naturalizada a condiciones muy distintas que extraídas de su particular entorno no prosperan adecuadamente, a pesar de que por ejemplo se les suministra un agua de «mejor» calidad, es decir con una concentración de sales más baja. Muchas de estas plantas salinas se están empleando para la producción vegetal con distintos fines, cultivadas con aguas con elevada concentración de sales (Glenn *et al.*, 1998). Para una mayor profundización sobre este tema, tanto de las técnicas analíticas como de la calidad del agua de riego puede seguirse el trabajo de Moreno *et al.* (1996), que trata el tema de las aguas residuales desde la óptica de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, que son excesivamente permisivos. Por ello, veamos algunas consideraciones al respecto.

La calidad del agua residual, depurada o no, para su destino al riego agrícola vendrá dada por las características físicas, químicas y biológicas que su aplicación aconsejen en función del cultivo a regar.

De todas formas, conviene simplificar esta caracterización acotando los distintos parámetros del agua en función de los intervalos más frecuentes de tolerancia que presentan los cultivos. De este modo tendremos que la calidad del agua vendrá dada por aquel nivel de sustancia, componente o combinación de ellas que afecten al crecimiento y desarrollo del cultivo. En algunos casos se admiten umbrales de rentabilidad, es decir que se pueden emplear aguas de peor calidad sabiendo que su empleo va a disminuir el rendimiento en una determinada proporción, porcentaje que el agricultor asume cuando no dispone de aguas de mayor calidad o el precio que tuviera que pagar por esa mayor calidad supera el mayor rendimiento que se obtiene. La calidad exigida al agua de riego también se ve limitada por el

nivel máximo que el suelo puede soportar o acumular con el uso reiterado de ese agua o simplemente porque las restricciones sanitarias y legales desaconsejan el empleo de aguas que presenten contenidos superiores en ese elemento o sustancia.

En cualquier caso, la caracterización de la calidad del agua para el riego se complica en el caso de la reutilización de aguas residuales depuradas debido a la gran cantidad de componentes presentes en la misma. Se necesita un estudio previo con un estudio detallado del origen y procedencia de ese agua residual para limitar al máximo el número de parámetros a analizar, ya que el coste de los análisis se incrementa con el número de parámetros a analizar (Tabla 10).

Aparte de una correcta analítica es necesario definir correctamente el lugar de muestreo, la frecuencia y número mínimo de análisis representativos y su seguimiento estacional, cuestiones que no deben dejarse a la improvisación.

Debe saberse que las aguas procedentes de zonas urbanas son más o menos constantes durante todo el año, salvo en las áreas donde abundan las segundas residencias o zonas turísticas. Mientras, las procedentes de industrias agroalimentarias presentan una marcada estacionalidad conforme a las épocas de recolección y al proceso de elaboración seguido.

También, se está obligado en conocer la evolución estacional de la calidad del agua. Puesto que los cultivos presentan una mayor sensibilidad a la composición del agua en los estados iniciales, mientras que tienen una mayor tolerancia en estados más avanzados de su crecimiento y desarrollo.

De igual forma, las restricciones que desde un punto de vista sanitario se aplican para el empleo del agua residual son más severas al final del cultivo, cuando la producción ya este formada y el riesgo de contaminación es alto, que en cualquier otro momento, ya que se trata de evitar la acumulación de sustancias tóxicas en la superficie del cultivo o en sus frutos, que

con posterioridad irán a consumo humano. Tal es el caso, que por ejemplo, en Alemania está prohibido el riego con aguas residuales depuradas 30 días antes de la recolección.

Tabla 10. Principales parámetros a determinar en un análisis de agua residual (y I)

Parámetro	Símbolo	Unidad
Físicos		
Materia en suspensión	MES	mg L ⁻¹
Actividad del ión hidronio	pH	-
Salinidad: Contenido de sales		
Conductividad eléctrica	CE _a	dS/m
Sales disueltas totales	SDT	mg L ⁻¹
Cationes		
Calcio	Ca ²⁺	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Magnesio	Mg ²⁺	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Sodio	Na ⁺	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Aniones		
Carbonatos	HCO ₃ ³⁻	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Bicarbonatos	CO ₃ ²⁻	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Cloruros	Cl	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹ o meq L ⁻¹
Riesgo de sodificación		
Tasa de adsorción de sodio ajustada	SAR ^o	-
Elementos nutritivos		
Nitratos	NO ₃ -N	mg L ⁻¹
Aminiacos	NH ₃ -N	mg L ⁻¹
Nitrógeno orgánico	N-org	mg L ⁻¹
Nitrógeno total	N	mg L ⁻¹
Fósforo ortofosfato	PO ₄ -P	mg L ⁻¹
Fósforo total	P	mg L ⁻¹
Potasio	K	mg L ⁻¹
Biológicos		
Materia orgánica biodegradable	MOB	mg L ⁻¹
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	mg O L ⁻¹
Demanda química de oxígeno	DQO	mg O L ⁻¹
Oxígeno disuelto total	O ₂	mg O L ⁻¹
Patógenos		
Coliformes totales	CT	NMP/100mL
Coliformes fecales	CF	NMP/100mL
Virus	V	UFP/100mL
Protozoos		NMP/100mL
Helminths		NMP/100mL
Otras bacterias		NMP/100mL

NMP: Número más probable. UFP: Unidades formadoras de placa.

La primera caracterización que debe hacerse de un agua residual es la de su procedencia. Con ella, podemos definir que parámetros convendrá analizar e incluso conocer sobre que rango deben variar, no obstante la interpretación de los análisis debe hacerse con

cautela y ante cualquier dato anormal es recomendable repetir el muestreo y los análisis e incluso ampliar el número de parámetros y elementos a analizar. Cuando se trate de industrias agroalimentarias, debe tenerse presente que puede ser un vector de propagación de enfermedades y plagas ; ya que en muchos casos estas industrias se instalan próximas a las zonas de producción y por tanto el agua residual que general puede ir a regar esos mismos productos. En estos casos deberá hacerse un estudio analítico adicional para evitar la propagación, a los campos de cultivos, de enfermedades que se pueden dar durante el proceso de manipulación de la cosecha y en especial de sus residuos.

Tabla 11. Principales parámetros a determinar en un análisis de agua residual (y II)

Otras sustancias orgánicas			Estables a los procesos convencionales de tratamiento
Fenoles		mg L ⁻¹	Su presencia está condicionada por la biodegradabilidad que los distintos compuestos orgánicos presentan
Plaguicidas y productos similares		mg L ⁻¹	Se entiende por plaguicida y productos similares los insecticidas, los herbicidas, los fungicidas y los PCB y los PCT
Hidrocarburos clorados		mg L ⁻¹	
Otras determinaciones			
Radiactividad alfa total		Bequerelios/L	Para el caso de aguas procedentes de la refrigeración de instalaciones nucleares
Radiactividad beta total		Bequerelios/L	
Silicio	SiO ₂	mg L ⁻¹	
Carbono orgánico total	COT	mg L ⁻¹	
Microelementos			
<i>Grupo I: Frecuentes</i>			
Aluminio	Al	mg L ⁻¹	No lo necesitan las plantas, produce alteraciones en la disponibilidad de nutrientes en el suelo
Boro	B	mg L ⁻¹	Lo necesitan aunque hay grandes diferencias
Cobre	Cu	mg L ⁻¹	Necesario en concentraciones entre 2 y 4 ppm, tóxico cuando > 20 ppm
Fluoruro	F	mg L ⁻¹	
Hierro	Fe	mg L ⁻¹	Las necesidades varían entre cultivos
Litio	Li	mg L ⁻¹	
Manganeso	Mn	mg L ⁻¹	Es necesario, pero su toxicidad depende de la relación Fe/Mn
Zinc	Zn	mg L ⁻¹	Es necesario, pero tóxico a partir de 200 ppm
<i>Grupo II: Ocasionales</i>			
Arsénico	Ar	mg L ⁻¹	No lo necesitan las plantas
Berilio	Be	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Cadmio	Cd	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Cobalto	Co	mg L ⁻¹	Necesario para leguminosas a < 0.2 ppm en peso seco del vegetal
Cromo total	Cr	mg L ⁻¹	No lo necesitan, la toxicidad es baja
Molibdeno	Mo	mg L ⁻¹	Lo necesitan, concentraciones en tejidos 0.1 ppm; toxicidad baja
Niquel	Ni	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico cuando la concentración en la planta > 50 ppm
Plomo	Pb	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Selenio	Se	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico cuando la concentración en la planta > 50 ppm
Vanadio	Va	mg L ⁻¹	Necesario para ciertas algas pero es tóxico a > 10 ppm en peso seco del vegetal
<i>Grupo III: Raros</i>			
Estaño	Sn	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Plata	Ag	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Titanio	Ti	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Tungsteno	W	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas
Bario	Ba	mg L ⁻¹	No lo necesitan y es tóxico para las plantas

4.1 Características físicas del agua de riego

Las características físicas del agua residual van a venir determinadas por los tratamientos previos del agua, su almacenamiento y por las condiciones ambientales en el momento de la aplicación. En general, son parámetros que presentan una mayor variabilidad que las propiedades químicas o biológicas. Deben considerarse los siguientes parámetros:

• Temperatura

La temperatura del agua residual va a estar determinada por el tratamiento previo del agua y su paso o no por balsas o depósitos de regulación o almacenamiento que tienden a mantener una temperatura próxima a la del aire.

La temperatura del agua influye en los valores que toman los coeficientes de solubilidad de las diferentes sustancias que están en disolución, originando cambios en sus concentraciones. Tanto por que se vean favorecida la capacidad de disolución, como por que se favorezca la formación de precipitados. Sin embargo, por las características propias de estas aguas tenemos los siguientes casos:

- a) Las aguas residuales proceden de un sistema de refrigeración y su temperatura es distinta a la ambiental.
- b) Las aguas residuales proceden de aguas relativamente limpias con concentraciones orgánicas muy bajas (es decir son agua con bajo índice de turbidez), en este caso se mantendrá la temperatura constante próxima a la ambiente.
- c) Las aguas por los procesos biológicos de oxidación y degradación de la materia orgánica van a generar un incremento de la temperatura del agua.

Parámetros como la conductividad eléctrica del agua (*CEa*) quedan determinados en función de la temperatura. En este caso se obtienen valores diferentes para cada temperatura.

Los métodos oficiales de análisis señalan para la determinación de la *CEa* una temperatura de 20°C, aunque se viene empleando de modo reiterando por distintos autores la medida de la *CEa* a 25 °C, aunque existen correlaciones para ambas temperaturas.

• Color

El color lo da la presencia de sustancias disueltas de naturaleza orgánica e inorgánica. Estos dos tipos de sustancias al ser cuantificadas analíticamente nos reportan una mayor información que el color. Aunque este parámetro no debe despreciarse y debe tenerse como guía o chivato para mantener una determinada calidad. Conviene distinguir entre color verdadero, que es el debido a las sustancias disueltas en el agua, del color aparente que es el producido por sustancias en suspensión, debido a la variación del ángulo de reflexión de la luz.

• Sabor y olor

De los parámetros sabor y olor el más interesante de cara a la reutilización de aguas residuales es el olor, que se debe en la mayoría de las ocasiones a impurezas de naturaleza orgánica disueltas. Aunque, no deja de ser propiedades subjetivas, reviste especial importancia a la hora de realizar trabajos sobre el área de riego o depósito del agua. Así los operarios que manejen este tipo de aguas deberán adecuar sus dispositivos de protección e higiene a esta circunstancia. También, especial atención nos merece el olor cuando se pueda ver afectado el público en general, como puede ser en zonas recreativas, deberá ser eliminado o al menos reducido.

• Turbidez

La turbidez del agua, es un parámetro que indirectamente nos puede dar una idea de la presencia de partículas de arcilla, limo, restos vegetales, materia orgánica o microorganismos. Gracias a la facilidad para su control, pues la turbidez lo que produce es una absorción o dispersión de la luz, se emplea este parámetro como control de la calidad biológica.

• Sólidos en suspensión

La presencia de sólidos en suspensión, tanto de naturaleza orgánica como inorgánica, pueden afectar tanto a los cultivos, al suelo, como al sistema de riego, sobre el que causan continuos trastornos por obturación de goteros, aspersores, tuberías, válvulas, filtros y otros elementos del riego. Se expresa como sólidos totales, incluye tanto el residuo filtrable como el residuo no filtrable o coloides.

4.2 El contenido de sales y la salinidad del agua de riego

La salinidad del agua de riego, o el contenido en sales, es uno de los principales parámetros que determina su calidad. Se puede considerar como relación aproximada entre la conductividad eléctrica del agua de riego (*CEa*) y el contenido en sales disueltas totales (*SDT*) de tal forma que se tiene:

$$SDT \text{ (mg/L)} = CEa \text{ (dS/m)} \times 640$$

O bien, se puede determinar directamente empleando un conductivímetro y calculando la concentración de las distintas sales que están disueltas en el agua.

A partir del contenido de sales en el agua que se emplea en el riego se establece la concentración que se alcanza en el suelo. El balance de sales en el suelo se establece en relación a las sales incorporadas con el agua de riego, por la lluvia, por la liberación de sales del suelo o por los fertilizantes será igual a las sales extraídas por el cultivo más las sales perdidas por lavado o drenajes y más la variación del contenido de sales en el suelo.

Las normas americanas de Riverside clasifican la calidad de las aguas de riego en función de la conductividad eléctrica, medida a 25°C (Tabla, 12).

Tabla 12. Clasificación de las aguas de riego según su conductividad eléctrica

Clase	CEa 25°C (dS m ⁻¹)	Salinidad	Comentarios
C1	< 0.25	Baja	El agua puede emplearse para el riego sin peligro de salinización para la mayoría de los suelos
C2	0.25-0.75	Media	Pueden cultivarse plantas tolerantes a estas concentraciones sin necesidad de tomar precauciones especiales. En el resto de los casos un drenaje moderado del suelo permite alcanzar los máximos rendimientos de los cultivos
C3	0.75-2.25	Fuerte	Agua no apta par el riego en suelos sin drenaje o con drenaje defectuoso. Con buen drenaje puede emplearse en cultivos tolerantes a este contenido de sales
C4	2.25-5.00	Muy alta	Agua no recomendable para el riego. Salvo cuando se trate de suelos muy permeables o con muy buenos sistemas de drenaje y cultivos que toleren este contenido de sales
C5	5.00-20.00	Excesiva	Sólo se puede emplear para el riego de suelos totalmente arenosos, muy bien drenados y con cultivos excepcionalmente tolerantes
C6	> 20.00	-	Aguas salobres

4.3 Alteración de la capacidad de infiltración de agua. Riesgo de sodificación

El sodio presente el agua una vez incorporado al suelo afecta directamente a la estructura de éste. Produce la disgregación de la láminas de arcillas, deteriorando la estructura y disminuyendo la capacidad de infiltración del suelo. Su efecto está relacionado con la concentración relativa del resto de cationes y aniones.

Aunque, la velocidad de infiltración de un suelo está determinada por sus características físicas como son la textura, tipo de minerales de arcilla que lo forman, por sus propiedades químicas como son los tipos de cationes intercambiables y por las propiedades biológicas, como es el contenido en materia orgánica. Cuando la velocidad de infiltración de un suelo

descienda de 3 mm h^{-1} , habrá que determinar la causa que ha producido este descenso y corregirla. Este parámetro del suelo se mide fácilmente mediante un infiltrómetro.

Existe una estrecha relación entre la conductividad eléctrica y la infiltración, ya que aguas «muy puras» con $\text{CEa} > 0.2 \text{ dS m}^{-1}$ e incluso menores de 0.5 dS m^{-1} tienden a lavar el suelo deshaciendo los agregados y liberando partículas muy finas que acaban obstruyendo los poros del suelo y por tanto reduciendo la velocidad de infiltración.

Con la presencia de sodio y especialmente cuando supera la concentración de calcio en una proporción de 3:1 se presentan problemas de infiltración. Es la desagregación de la estructura del suelo ocasionada por la sustitución del calcio que formaba parte del complejo de cambio por el sodio, la que obtura los poros del suelo y dificulta el movimiento del agua.

Para caracterizar los problemas potenciales de infiltración se aplica la ecuación propuesta por Suarez (1981) que determina la relación de adsorción de sodio corregida (SAR^o), en función de las concentraciones de calcio y magnesio, conforme a la fórmula:

$$\text{SAR}^o = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^o + \text{Mg}}{2}}}$$

No obstante el SAR^o , o corregido, es aproximadamente igual a al SAR sin corregir (cuando se determina a partir del contenido de calcio obtenido en los análisis del agua) aumentado o disminuido en un diez por ciento.

Tabla 13. Clasificación del riesgo de alcalinización o de los problemas potenciales de infiltración

Clase	SAR^o	Riesgo de alcalinización
S1	< 10	Bajo
S2	10-18	Medio
S3	18-26	Alto
S4	> 26	Muy alto

Tabla 14. Estimación de la concentración de calcio corregido en la interfase suelo-agua

HCO ₃ /Ca	Salinidad del agua de riego, dS m ⁻¹											
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
0.05	13.20	13.60	13.91	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
0.10	8.31	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	7.57	7.91
0.25	4.51	4.56	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.34	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.10	2.23	2.33
1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.54	1.63	1.70
2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.30	1.37	1.42	1.51	1.58
2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.40	1.47
3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.02	1.07
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99
5.00	0.61	0.63	0.69	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37

Fuente: Recopilado de Suarez (1981).

Siendo Na, la concentración de sodio en meq L⁻¹, Mg la concentración de magnesio en meq L⁻¹ y Ca^o la concentración en meq L⁻¹ de calcio corregida al contenido de carbonatos presentes en el agua en función de la salinidad y de l cociente HCO₃/Ca (Tabla 14), relación que se aplica bajo los supuestos: que se han alcanzado las condiciones de equilibrio, no se produce precipitación del magnesio y la presión parcial del CO₂ es de 0.0007 atmósferas.

La velocidad de movimiento del agua por su seno, disminuyen conforme aumenta el valor del SAR^o y desciende la conductividad eléctrica del agua de riego. Aunque, esto no es cierto en toda su amplitud, ya que después del riego con agua salina el porcentaje de sodio intercambiable (*PSI*) del suelo tiende a equilibrar el SAR del agua de riego, al mismo tiempo

que el agua se pierde por la evapotranspiración, la conductividad eléctrica y el *SAR* del agua del suelo así como el *PSI* aumentan.

4.4 El agua residual como fuente de aporte de elementos nutritivos para las plantas

Una de las ventajas que se destacan del empleo de aguas residuales para el riego de cultivos es por la presencia de elementos nutritivos. Sin embargo, todos los procesos de depuración a los que se suele someter al agua residual antes de su aplicación y máxime en cumplimiento de las normas establecidas para este uso (véase el capítulo 3) prácticamente reducen la presencia de este tipo de sustancias a cantidades despreciables. Sólo, en el caso de los filtros verdes en los cuales se emplea aguas residuales, solamente sometidas a un tratamiento de depuración primario que consiste únicamente en la eliminación de elementos gruesos, tierras, arenas y grasas, garantiza la aplicación de grandes cantidades de nutrientes que si pueden equipararse a una fertilización.

En este caso la homogeneidad en las características del agua durante todo el ciclo del cultivo es, ahora, un problema. Se tiene que el aporte adicional de nutrientes es constante y por esta razón puede no adaptarse adecuadamente a las demandas de los cultivos, esto ocurre cuando el aporte de nutrientes supera en algún momento las necesidades del cultivo. Si esto no se cumple, el problema no sucede, y lo único que hay que hacer es descontar esta cantidad aportada con el agua de la dosis de fertilizante que se aplique en cada momento.

De entre estos compuestos el que destaca es el **nitrógeno**. Éste es uno de los principales elementos responsable de los procesos biológicos que tiene lugar en las aguas. Las

formas en las que aparece, por orden cronológico de importancia relativa, son nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. El primero es indicativo de contaminación reciente y el último indica que se trata de un agua que ha pasado el tiempo suficiente para que se produzca la oxidación de los compuestos del nitrógenos, siguiendo las reacciones de nitrificación. No obstante la Directiva 111/91 relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, regula las cantidades de nitrógeno «residual» que se pueden tolerar en las aguas, además indica una serie de normas de buenas prácticas agrícolas (así la cantidad máxima de nitrógeno contenido en el estiércol aplicado a los campos es de 210 kg N ha^{-1} , los primeros cuatro años, y a partir de esta fecha de 170 kg N ha^{-1} , aunque estas cantidades pueden modificarse por los Estados Miembros mientras se cumplan los objetivos).

El **fósforo** suele encontrarse en forma de fosfatos procede del empleo de detergentes, muy común en las aguas residuales domésticas, o de fertilizantes, en las aguas de origen agrario. Es el principal agente de la eutrofización, y su importancia para la reutilización de aguas para riego se debate entre el doble dilema de que su exceso puede producir la proliferación incontrolada de algas u otros microorganismos y obturar el sistema de riego y que es un buen fertilizante.

El contenido en **potasio** en las aguas residuales suele ser bajo. Tiene un efecto antagónico frente al calcio o al magnesio y de sustitución con el sodio.

4.5 Contenido en microelementos

La procedencia del agua residual determina el contenido en microelementos. Su caracterización nos lleva a determinar aquellos elementos que con más frecuencia aparecen en

las aguas residuales. Entre ellos hay que diferenciar los que no son necesarios para el crecimiento y desarrollo de los cultivos y los que si son imprescindibles. Esto nos lleva a determinar el riesgo de toxicidad que su presencia reporta. Toxicidad que puede ser directa, al afectar al cultivo o indirecta por acumulación, tanto sobre o en la planta (cuando no presenta un síntoma de toxicidad hasta alcanzar un determinado umbral), o por acumulación en el suelo y toxicidad inducida a través de las raíces del cultivo.

Por microelementos se entiende el conjunto de elementos químico presentes en el medio en bajas concentraciones. Su interés reside en: a) aquellas sustancias que en pequeñas cantidades son necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y por tanto se les puede denominar **micronutrientes**, aunque en grandes cantidades pueden ser perjudiciales, b) todos aquellos que no los necesitan las plantas o al menos no tienen una función biológica conocida y se les considera como **peligrosos** o incluso tóxicos, afectando al normal crecimiento y desarrollo de las plantas, y c) aquellos que sin afectar a la planta, ésta los puede ir acumulando y afectar a los usos posteriores que se haga de la planta, es decir que el consumo de estas plantas serían **tóxicas** para los animales o para las personas.

Tabla 15. Clasificación del agua en función del contenido en Boro.

Clase	Concentración de boro (mg L ⁻¹)	Riesgo de fitotoxicidad	Comentarios
B1	< 1.0	Bajo	La mayoría de los árboles frutales y la vid son sensibles a contenidos superiores
B2	1.0-2.0	Medio	Pueden verse afectados los cultivos que presentan una tolerancia media o inferior
B3	2.0-4.0	Alto	Sólo se admite en este intervalo el empleo de cultivos tolerantes
B4	> 4.0	Muy alto	Sólo se recomienda el empleo de estas aguas en cultivos muy tolerantes

Entre los microelementos presentes en el agua residual que pueden afectar al crecimiento de las plantas destacan los metales pesados hierro, manganeso, cobre, zinc, cadmio, níquel y plomo, elementos que además se acumulan en la planta (Inglés *et al.*, 1992; Moreno *et al.*, 1992). Otras sustancias que pueden contener las aguas residuales menos nocivas que las anteriores, por su bajo contenido, son cromo, selenio, arsénico, antimonio, molibdeno, titanio, estaño, bario, berilio, uranio, vanadio, cobalto, talio, telurio y plata.

4.6 Características biológicas de las aguas residuales

Los aspectos biológicos de las aguas residuales constituyen uno de los principales parámetros que se emplean para determinar su calidad. Las explotaciones ganaderas y los núcleos urbanos son los que añaden más residuos biológicos al agua. Este tipo de sustancias se puede caracterizar indirectamente a partir de las necesidades de oxígeno. El contenido de este elemento en el agua en condiciones normales de temperatura de 25°C y una atmósfera de presión se tiene una solubilidad de 8.32 mg L⁻¹. Los peces y otras especies acuáticas requieren al menos 2 mg L⁻¹ de oxígeno disuelto para mantenerse con vida. La demanda del oxígeno disuelto en el agua viene determinada por las sustancias que se oxidan en su presencia.

Las aguas saturadas de oxígeno (aproximadamente cuando superan 9.1 mg L⁻¹ a 20°C) no presentan ni olor ni sabor, por esta razón mantener altos niveles de oxígeno en el agua permite controlar los olores que se pueden producir. Aunque el mayor contenido en oxígeno produce un mayor riesgo de corrosión.

El contenido en materia orgánica se mide a través de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), el oxígeno disuelto total (O) y el

carbono orgánico total (COT). Sin embargo, ninguno de estos parámetros proporciona información sobre el tipo de materia orgánica que se trata o sobre sus componentes principales. Por eso se hace necesario realizar un análisis toxicológico o microbiológico completo para la determinación de las sustancias orgánicas que lo componen y conocer sus concentraciones.

La diferencia entre la DQO y la DBO₅ da la cantidad de materia orgánica no biodegradable.

Las aguas faltas de oxígeno producen una descomposición anaerobia o reductoras, generando sustancias que dan olores desagradables: NH₃, H₂S, PH₃, etc. (Contreras y Molero, 1993).

4.7 Patógenos presentes en las aguas residuales

La presencia de elementos patógenos es lo que más a traído el empleo de aguas residuales en la agricultura, debido al riesgo potencial de transmisión de enfermedades y de propagación de epidemias. El empleo de aguas residuales depurados o no para el riego supone la incorporación de organismo extraños al suelo, debido a que es técnicamente imposible alcanzar una efectividad completa en los procesos de tratamiento actuales o incluso por la resistencia que presentan algunos microorganismos patógenos a estos procesos.

Las concentraciones de bacterias están estrechamente relacionadas con el contenido en materia orgánica ya que al ser estas heterótrofas necesitan una fuente de carbonos de naturaleza orgánica. Esta asociación es la que lleva a eliminar la materia orgánica para eliminar a los patógenos.

Son muchos y difícil de medir la presencia de estos patógenos. Por esta razón se acude a la medida de los coliformes fecales, que si bien no tiene efectos tóxicos, su elevada abundancia en las aguas residuales urbanas frente a otros, facilita su medida. La concentración de coliformes fecales o totales es la referencia que se toma para definir la calidad desde el punto de vista bacteriológico. No obstante, en función de la procedencia de las aguas residuales se deberá realizar un análisis más completo del contenido de virus y bacterias, sobre todo de aquellos que tiene como medio de propagación el agua.

La luz del sol, sobre todo la radiación ultravioleta, tienen un efecto letal sobre la mayoría de virus y bacterias. Sin embargo, el contenido en arcilla y en materia orgánica del suelo contribuyen a su adsorción y permanencia.

4.8 *Microcontaminantes de origen orgánicos*

Los microcontaminantes orgánicos son sustancias orgánicas presentes en aguas aparentemente no contaminadas o presentes en muy bajas concentraciones. Aunque la mayoría de estos compuestos tienen probablemente un origen natural, a las concentraciones tan bajas que se encuentran no suelen presentar ningún inconveniente al uso de estas aguas.

El empleo de compuestos orgánicos sintéticos en distintas actividades tanto industriales como agrícolas hacen que muchas de estas sustancias, potencialmente tóxicas, acaben en el agua (Chang y Page, 1990). Entre estas sustancias cabe destacar los siguientes grandes grupos: compuestos fenólicos, ésteres de falato, naftalenos, hidrocarburos aromáticos monocíclicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, éteres halogenados, bifenilos policlorados, compuestos orgánicos nitrogenados, hidrocarburos alifáticos halogenados y pesticidas organoclorados.

La actividad **agraria**, incluidas las granjas intensivas de producción animal, están sometidas al empleo continuado de compuestos específicos y con elevado riesgo de contaminación cuando el manejo no es el correcto. Pesticidas, herbicidas, fungicidas son hoy en día de uso corriente en la explotación agrícola, compuestos que en general están caracterizados por una determinada persistencia, biodegradabilidad y selectividad. Aunque, no deberían acabar en las aguas residuales. Esto puede suceder cuando se intensifica el cultivo o los tratamientos con agroquímicos a realizar en la explotación, pero es más, hay que tener en cuenta que las aguas de limpieza de pulverizadores, tanques o depósitos, etc. pueden acabar en la red de las aguas residuales.

También, las **explotaciones ganaderas** se ven obligadas a utilizar productos como desinfectantes, se emplean antibióticos y otras sustancias farmacéuticas para el tratamiento de animales, muchos de las cuales puede pasar a las aguas a través de las deyecciones y orinas del animal. Sustancias que en estos casos concretos convendrá tener en cuenta en la caracterización del agua residual.

Lo mismo sucede por productos de uso doméstico o en pequeñas industrias ubicadas en zonas urbanas y que vierten sus aguas directamente a la red de alcantarillado. Así tenemos entre estos productos, que deberán ser analizados en cada caso que se prevea su existencia o se tenga la obligación de llegar a este grado de detalle en la analítica del agua: son los que se emplean como insecticidas (organoclorados persistentes, organofosforados, organohalogenados y carbamatos), herbicidas, fungicidas, bifenilos policlorados (PCB) y policloratos totales (PCT).

4.9 Otras características particulares

Cuando el agua para reutilizar tenga un origen industrial es prioritario conocer el proceso productivo que se ha seguido, puesto que en función del mismo se originarán un tipo u otro de sustancias que se vierten en las aguas residuales.

Tabla 16. Formas de eliminar la carga contaminante presente en un agua bruta

Contaminante	Tratamientos
Sólidos en suspensión	Sedimentación Desbaste Filtración Decantación Adición de polímeros o reactivos químicos Coagulación-sedimentación
Materia orgánica biodegradable	Tratamiento por fangos activados Filtros percoladores Discos biológicos Lagunaje Filtración intermitente en arena Otros procesos físico-químicos
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón activo Ozonización
Patógenos	Cloración Hipocloración Ozonización Microfiltración Radiación Ultravioleta
Nitrógeno	Sistemas de cultivo suspendido (nitrificación-desnitrificación) Sistemas de película fija (nitrificación-denitrificación) Arrastre de amoníaco Intercambio de iones Eliminación biológica de nitrógeno
Fósforo	Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación con cal Eliminación biológica de fósforo
Metales pesados	Precipitación química Intercambio de iones
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio de iones Ósmosis inversa Electrodialisis

Conocer este proceso pueden facilitar la caracterización desde el primer momento de este agua. Aunque lo deseable en estos casos es realizar una auditoría ambiental de la empresa para reducir la contaminación de las aguas que emplea o incluso procurar su reutilización en el propio proceso de producción.

5. EL CULTIVO CON AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

En todo tipo de riego con aguas residuales debe considerarse en primer lugar en términos de calidad de agua los factores limitantes que impone el tipo de cultivo, desde tres puntos de vista: agronómico, técnico y sanitario; y en segundo lugar los condicionantes edafológicos. Habrá también que considerar la interacción entre el suelo y el agua residual tratada, evaluando la depuración o afino de las aguas residuales que se produce a lo largo de su paso por el perfil del suelo, así como el efecto depurador que ejerce el cultivo.

Una vez definidas con claridad estas restricciones cualitativas se llega a definir la calidad del agua necesaria para el riego y compararla con las características del efluente del que se dispone.

La cuestión fundamental a resolver es si la calidad del agua residual depurada permite su empleo para el riego del cultivo o rotación de cultivos sin ningún problema agronómico, técnico, sanitario o legal. El empleo de estas aguas para el riego, abre la posibilidad a la existencia de aguas de diferentes calidades en una misma zona. Aspecto que ya viene aplicándose en lugares donde este recurso escasea mediante la reutilización de las aguas de drenaje y su mezcla con las aguas naturales, reduciéndose al mismo tiempo este tipo de vertidos. Una práctica común en estos casos es destinar las aguas de mejor calidad a aquellos cultivos más sensibles.

De hecho las nuevas técnicas en hidroponía se basan en circuitos cerrados en los cuales las aguas de drenaje se recuperan y mezclan con el agua de riego, aunque esta técnica supone un control riguroso de las sales aplicadas con los fertilizantes, para mantener la conductividad eléctrica dentro de los rangos establecidos para cada punto del circuito.

Existen otras opciones que pueden ser más económicas, facilitar la gestión y emplear aguas de baja calidad que en otros casos no estarían recomendadas para el cultivo. Tenemos las siguientes alternativas:

- 1.- **Dilución** de diferentes calidades de aguas que se mezclan de tal forma para obtener un agua aplicable al cultivo en cuestión;
- 2.- **Aplicación alternativa**, alternar el uso de agua de buena y mala calidad de acuerdo a su disponibilidad y a las necesidades del cultivo, esta opción puede subdividirse en:
 - a) Alternar el empleo de las aguas en distintos estados de desarrollo del cultivo.
 - b) Regar alternativamente dentro de un mismo ciclo que podría ser por ejemplo si se trata de un agua salina regar con agua buena durante el día y reservar el agua de peor calidad (salina) para la noche.
- 3.- **Programar** el uso de las distintas calidades de agua de acuerdo con los estados críticos del desarrollo del cultivo.
- 4.- **Seleccionar los cultivos** que mejor se adapten a la calidad del agua disponible, selección que vendrá dada por los factores agronómicos limitantes, imponiendo una determinada calidad mínima del agua que deberá cumplir el agua residual para poder ser empleada en este cultivo, en caso contrario habrá que elegir un cultivo menos exigente.

La decisión de cuál opción tomar va a venir determinada por los resultados de los análisis de las calidades de las aguas de que se disponen, de la tolerancia de los cultivos de la

explotación o seleccionados, la sensibilidad foliar de éstos por contacto con el agua residual, las propiedades del suelo (riesgo de sodificación), posibilidades de lavado, los equipos necesarios para llevar a la práctica cada opción y por ultimo el estudio económico y financiero de cada una de estas alternativas.

Mezcla de dos tipos de aguas de calidades distintas

Agronómicamente la primera opción no presenta ningún problema pues se trata de elegir el cultivo apropiado para el agua resultante. El cálculo de la calidad del agua resultante es sencillo, se puede aplicar la siguiente relación:

$$CE_f = (CE_{a_1} \times \frac{Q_1}{Q_t}) + (CE_{a_2} \times \frac{Q_2}{Q_t})$$

Siendo :

CE_f : Conductividad eléctrica del agua final resultante (dS m^{-1})

CE_{a_1} : Conductividad eléctrica del agua tipo uno (dS m^{-1})

CE_{a_2} : Conductividad eléctrica del agua tipo dos (dS m^{-1})

Q_1 : Cantidad de agua o dotación empleada de tipo uno ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ o mm)

Q_2 : Cantidad de agua o dotación empleada de tipo dos ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ o mm)

Q_t : Cantidad de agua o dotación empleada total aplicada ($Q_t = Q_1 + Q_2$)

Sin embargo, esta forma de proceder no suele ser muy corriente salvo, las recirculaciones que se establecen en los sistemas de riego por superficie, en la que el agua sobrante de un tablar o surco se recoge para aprovecharlo en otro situado a cierta cota inferior. Aunque, no ocurre lo mismo en los riegos de campos de golf, en los cuales la mayoría de la red de drenaje va a parar a los lagos que al mismo tiempo sirven de balsas de agua para el riego desde los que se efectúa el bombeo del riego. Esto nos llevaría, por un lado a disponer de un agua de calidad conocida ya sea procedencia subterránea o superficial y otra que

correspondería a la fracción de lavado con que el sistema de riego está trabajando, con un contenido de sales que vendría dada por la conductividad eléctrica del agua de drenaje, teniendo en cuenta que tras varios riegos sucesivos la concentración de sales acumuladas se aproxima a una concentración de equilibrio que vendrá dado por la fracción de lavado y la salinidad del agua de riego, así se puede calcular la conductividad eléctrica del agua de drenaje:

$$CE_d = \frac{CE_a}{FL}$$

Siendo,

CE_d : Conductividad eléctrica del agua de drenaje, se considera que esta salinidad es la que contiene la zona radicular en el momento de iniciarse el lavado (dS m^{-1}).

CE_a : Conductividad eléctrica del agua de riego (dS m^{-1}).

FL : Fracción de lavado.

Aunque, debe añadirse la salinidad debida a los fertilizantes (CE_f) aplicados en el manejo del cultivo y que pueden pasar al agua de drenaje, resultando una nueva conductividad eléctrica (CE_d') valor mayor que el calculado con anterioridad.

En la mezcla de estas aguas hay que considerar también los valores resultantes de los demás parámetros que caracterizan el agua. Valores nuevos que se calcularían de forma análoga, pero en vez de conductividades eléctricas tendremos concentraciones.

Riego con aguas de distinta calidad realizando la dilución en el suelo

Otra procedimiento, en el riego con aguas de baja calidad es provocar una dilución o mezcla en el suelo. Hay que considerar separadamente el efecto que cada aplicación produce sobre el cultivo. Así una aplicación con aspersión puede estar contra indicada para una gran mayoría de las aguas residuales cuando estas dañan a las hojas, por ejemplo un contenido de

cloro superior a 5 meq L^{-1} en riego diurno por aspersión produce serios daños en las hojas de almendros, albaricoqueros, ciruelos o limoneros. Por el contrario, presenta ventajas ya que mejora la dilución del suelo y reduce el riesgo de daño al cultivo, caso recomendable cuando el problema es salino. Así, si se dispone de riego por aspersión y la mezcla de las dos aguas disponibles no reduce los valores de daños por aplicación sobre las hojas, si podemos acudir a regar durante la noche con las aguas de peor calidad, para reducir al mínimo el efecto de concentración que produce la evaporación del agua sobre el cultivo, además si previamente hemos regado con el agua de mejor calidad habremos creado ya una película de agua que va a impedir una acumulación excesiva de sales sobre el cultivo.

Programación del riego según los estados fenológicos del cultivo

Si se dispone de la posibilidad de emplear el agua residual en momentos diferentes, estos riegos deben programarse para cuando el cultivo se vea menos afectado. Por ejemplo, antes de la nascencia o antes de la recolección. No obstante, habrá que determinar sobre el calendario los momentos críticos que el cultivo presente a alguno de los componentes que determinan la calidad de ese agua y que desaconsejan su empleo en ese estado de desarrollo.

Empleo de cultivos resistentes

Otra opción es buscar cultivos resistentes o con requisitos de calidad inferiores al agua que disponemos. Depende, exclusivamente, de las condiciones propias de la explotación y del plan de cultivos que se programe, que va a estar regulado por la situación del mercado de estos productos, es a todas luces la más sencilla de adoptar pues no requiere dispositivos especiales para el riego, aunque si es recomendable estudiar sus efectos a largo plazo, y sobre todo disponer de un número suficiente de cultivos como para poder establecer una rotación y

alternativa de cultivos viable. En nuestras condiciones tenemos cultivos tan importantes como la cebada, el sorgo, el trigo blando, la remolacha azucarera o el algodón que soportan adecuadamente riegos con conductividades eléctricas en el agua inferiores a 4 dS m^{-1} sin pérdida de producción. No ocurre, lo mismo con los cultivos hortícolas, mero el manejo del agua puede permitir alcanzar objetivos comunes.

La elección de los cultivos en este caso debe hacerse aplicando la función de producción que relaciona el rendimiento con la concentración del componente que limita su crecimiento o desarrollo.

Los estreses que genera el empleo de aguas de baja calidad tiene consecuencias directas sobre el cultivo, y por tanto cuando se empleen este tipo de aguas debe modificarse el manejo del cultivo. Uno de los síntomas más corrientes cuando se emplean aguas salinas es el menor desarrollo alcanzado por el cultivo, esto incide directamente en que las plantas no llegan a cubrir totalmente el suelo y por tanto se incrementa la fracción de evaporación directa, reduciendo la eficiencia en el uso del agua, pero además incrementando la concentración salina del suelo por ascenso capilar, así el incremento de la densidad y más concretamente la reducción de la separación entre las líneas de cultivo es una práctica recomendable en estos casos.

La salinidad y la falta de agua tienen efectos aditivos sobre la transpiración y el rendimiento del cultivo. La salinidad causa una reducción sobre los rendimientos máximos alcanzables y por tanto necesitan un menor aporte de agua, aunque separadamente la disminución del agua disponible reduce más el rendimiento que la salinidad (Shalhevet, 1994).

5.1 Exigencias que tienen los cultivos

Los cultivos son aquí considerados como demandantes de elementos o nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo que el agricultor debe suministrarles en las cantidades apropiadas. Debido a que la producción de los cultivos está asociada a los elementos nutritivos presentes en el suelo está sometida a la ley de rendimientos decrecientes, los excesos de nutrientes pueden repercutir negativamente en el cultivo. Por tanto es necesario cuantificar ese aporte extra para no sobrepasar los límites máximos y para ahorrar fertilizante comercial.

Las aguas residuales contienen elementos minerales utilizables en agricultura como fertilizantes. Las cantidades de estos nutrientes aportadas con el agua de riego varían según el tipo de efluente y la dosis de riego empleada. Estos aportes deben contrastarse con los cantidades requeridas por el cultivo con el objeto de reducir las necesidades de fertilizantes o abonos a aplicar.

El aporte producido por el empleo de aguas residuales se puede determinar de forma sencilla aplicando la expresión :

$$A_i = \frac{C_i \cdot D}{100}$$

Donde: A_i es el aporte de nutriente i en kg ha^{-1} , C_i concentración del elemento i en el agua de riego en mg L^{-1} y D es la dosis de riego aplicada en mm.

Este proceder nos da un idea del valor fertilizante del agua residual empleada, pudiendo ser una forma de clasificación de estas aguas. Pero hay que recordar que: la concentración de la sustancia i en el agua residual depende de la procedencia de esta, pudiendo ser variable en el tiempo y darse el caso que la máxima concentración en el agua residual se corresponda con las mínimas necesidades del cultivo, por eso conviene distribuir el aporte en períodos de tiempo

cortos y en función del ciclo del cultivo, además en determinados momentos del cultivo este aporte puede perjudicar tanto la calidad como la cantidad de la producción.

Tabla 17. Aportes de nitrógeno, fósforo y potasio de un efluente secundario medio obtenido como media de varias depuradoras de la Comunidad de Madrid (suponiendo un riego de $6.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Nitrógeno		Fósforo (P_2O_5)		Potasio (K_2O)	
mg L^{-1}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	mg L^{-1}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	mg L^{-1}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$
20-29	120-174	1-9	6-54 (14-124)	0.7-1	4.2-6 (5-8)

Fuente: Datos de concentraciones facilitados por el Canal de Isabel II.

• Macronutrientes contenidos en las aguas residuales

El nitrógeno presenta dos características importantes: su aporte como valor fertilizante y su alta movilidad que hace que fácilmente los excesos vayan a contaminar las aguas subterráneas, la Unión Europea tiene establecido, como se ha indicado anteriormente, un tope de 210 kg N ha^{-1} con el aporte de estiércol a los cultivos, es de suponer que este máximo se deba aplicar también a las aguas residuales (estaríamos tratando de aguas con más de 40 mg L^{-1} de nitrógeno). Otro elemento de interés es el nivel de fósforo en disolución ya que este compuesto es junto con los nitratos, el responsable de la eutrofización de las aguas, el control o manejo sostenible de este elemento requiere identificar los niveles de P en el suelo que superen las necesidades del cultivo y puedan enriquecer las aguas de escorrentía. Algunos países de la UE como Holanda tienen una legislación bastantes restrictiva respecto a este elemento, hasta establecer como límite $0,1 \text{ g L}^{-1}$ como P disuelto máximo en el agua subterránea. El incremento la aplicación de P al suelo incrementa la fracción extraíble y este incremento es mayor en los suelos con baja capacidad de retención de P, siendo inaceptables concentraciones superiores a 0.25 g L^{-1} en el agua de escorrentía.

Por esta razón, en la práctica del riego y cuando el lavado es considerable, se debe ajustar la dosis de nitrógeno aplicada para no sobrepasar la concentración máxima permisible

en las aguas de drenaje. Considerando que todo el nitrógeno contenido en el agua residual se convertirá en nitrato, se puede calcular la dosis anual de riego permisible en función del estado de desarrollo y crecimiento del cultivo estableciéndose una nueva dotación de riego requerida (D_{ni}) correspondiente al estado del cultivo en la fase i que va a presentar un nivel de extracción o inmovilización de nitrógeno (E_{nci})

$$D_{ni} = \frac{100E_{nci} + C_p FL_i}{(1 - f_i)C_n}$$

Siendo:

D_{ni} : la dotación máxima para el riego que permite mantener las concentraciones de nitrógeno por debajo del umbral establecido (mm año^{-1}) en estado de cultivo i .

E_{nci} : Extracción neta de nitrógeno por el cultivo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la fase i

FL : fracción de lavado, vendrá determinada por la conductividad del agua de riego, no obstante $la FL = D_{ni} - ET_{ri}$ siendo ET_{ri} la evapotranspiración real del cultivo en el estado i , o demanda neta de agua aplicar con el riego (mm año^{-1}).

C_p : Concentración máxima permisible de nitrato en el agua de lavado, en mg L^{-1} , se recomendando valores no superiores a 10 mg L^{-1} .

C_n : Concentración de nitrógeno en el agua residual aplicada en el riego (mg L^{-1}).

f_i : fracción de nitrógeno que aplicado con el agua de riego se pierde por volatilización o desnitrificación, valores normales recomiendan utilizar $f = 0.20$, aunque va a depender del tipo de suelo, condicionantes de la reutilización y de las condiciones del medio en es estado.

La dotación total de agua vendrá dada por la suma de todos estos resultados parciales:

$$D_n = \sum_{i=1}^{i=n} D_{ni}$$

Cuando el valor de esta dotación es inferior a la demanda por el cultivo cabe plantearse cuatro posibilidades:

- a) Aceptar la disminución del rendimiento que supondría aplicar dotaciones de riego inferiores a la requerida. Estaríamos en un claro ejemplo de riego deficitario, pero que conociendo la evolución del cultivo puede ser minimizado.
- b) Seleccionar un cultivo que tenga una demanda de nitrógeno mayor, puede que en determinados momentos del ciclo vegetativo sea necesario emplear los llamados cultivos captadores de nitrógeno, aspecto a tener en cuenta cuando se emplea agua residual en plantaciones arbóreas ya que su nivel de extracción de nitrógeno es inferior a las plantas herbáceas, así el empleo entre cultivos de gramíneas forrajeras como *agrostis*, *cynodon* o *poas* es recomendable.
- c) Realizar prácticas de laboreo que incrementen la fracción de volatilización del nitrógeno o las tasas de desnitrificación.
- d) Reducir la concentración de nitrógeno en el agua de riego, ya sea por la mezcla con otras aguas de menor contenido en este compuesto o por un tratamiento previo de eliminación del exceso de nitrógeno, sin embargo este tratamiento encarece la depuración del agua, y no interesa desde el punto de vista agronómico.

El potasio es otro elemento esencial para el desarrollo de las plantas. Las extracciones que realizan los cultivos varían entre los 25-50 kg K_2O ha⁻¹ para secano y los 150-200 K_2O ha⁻¹ para los de regadío, extracciones que se realizan bajo la forma iónica K^+ presente en la solución del suelo o fijada en el complejo adsorbente. Aunque, la cantidad de potasio aportado por el agua residual no suele ser importante salvo aguas procedentes de determinadas agroindustrias este aporte no debe despreciarse. La movilidad de este elemento es mayor en los suelos arenosos que en los arcillosos.

5.2 Respuestas de los cultivos frente a las aguas de baja calidad.

Las respuesta que presentan los cultivos al empleo de un agua de una determinada calidad está condicionada en un primer lugar por las características del suelo y en general del entorno. Las cantidades necesarias para que una sustancia produzca efectos tóxicos son muy diferentes de una plantas a otras. Si representamos la variación de su concentración en relación a la solución del suelo o al agua de riego, frente a los efectos que esta produce se obtiene una curva generalizada dosis-respuesta.

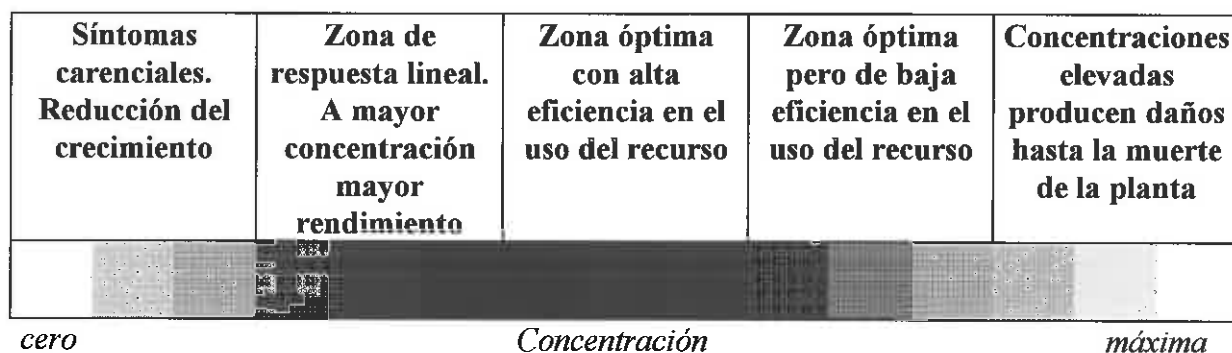


Figura 2. Diagrama que recoge los diferentes tipos de respuesta que se presentan en función de la concentración que se aplique. La gradación de color indica la zona de concentraciones óptimas, en las que se consiguen las mayores producciones o respuestas.

Sin embargo, estas relaciones no viene solas y en muchos casos nos interesa conocer las concentraciones relativas entre dos o más sustancias, debido a los fenómenos de adsorción en el suelo y de sustitución de cationes o aniones que en éste tienen lugar.

La evaluación de la calidad del agua de riego desde el punto de vista de los cultivos se puede medir por la eficiencia en el uso de un recurso:

$$EUR = \frac{\text{cantidad de recurso absorbida por la planta}}{\text{cantidad del recurso añadido en el agua de riego}} \times 100$$

El comportamiento que los cultivos presentan frente a un elemento o sustancia varía en

función del estado de desarrollo y crecimiento. En general presentan una menor tolerancia en los estados iniciales que en los adultos, tanto en cultivos herbáceos como en leñosos en los cuales las hojas y tallos más jóvenes son más sensibles a la alteración del medio. Pero es también, su adaptación la que ha permitido el que haya una gran variedad de tolerancias por ejemplo al contenido de sales en el agua residual.

Teniendo en cuenta el riesgo de toxicidad que el exceso de una sustancia añadida con el agua de riego nos conduce a ajustar la EUR de tal forma que el óptimo del uso del recurso se consiga cuando $EUR = 1$ siendo la cantidad del recurso absorbida por la planta iguala la cantidad necesaria para obtener el máximo rendimiento. Dado que la planta puede absorber valores por encima de los que requiere. Esto es lo mismo que decir que el manejo óptimo sería aquel que igualase la cantidad extraída por la planta con la añadida.

También, hay problemas de tolerancia por el riesgo de acumulación de metales pesados en cantidades que pueden ser tóxicas para la planta, o en concentraciones que no siendo tóxicas para la planta si lo pueden ser para el productor secundario que se beneficia, en praderas aprovechadas a diente por herbívoros la acumulación de metales pesados puede provocar graves daños, llegando por la cadena trófica hasta el hombre.

No obstante esta acumulación de metales pesados es aprovechada en algunas plantas, como los jacintos de agua, para actuar como depuradora verde, en la cual el cultivo se establece con el único propósito de extraer el contaminante de una forma sencilla, una vez cosechado se procede a una incineración controlada o si es necesario a una separación del compuesto en cuestión.

5.2.1 Tolerancia de los cultivos a la salinidad

Las aguas residuales en zonas costeras, como las zonas de levante, las costas andaluzas y las islas se caracterizan sobre todo por el elevado contenido en sales, al igual que sucede con las aguas procedentes del drenaje de tierras agrarias o de aguas subterráneas en acuíferos próximos a las costas. En estos casos si puede ser que el principal factor limitante del empleo de estas aguas en agricultura sea su contenido en sales. Además, según el avance del Plan Hidrológico Nacional (1993) se estima que en los próximos veinte años unos 300 Hm³ de agua empleada en el riego procedan de plantas desaladoras de agua del mar, con una desalación parcial, aprovechando que hay suficientes cultivos que pueden tolerar una moderada salinidad del agua de riego.

En estos casos es imprescindible determinar la fracción de lavado requerida para mantener en el suelo una determinada concentración, pues si no se produce un lavado del perfil la incorporación continua de sales al suelo incrementaría su contenido hasta límites intolerables por los cultivos. Así después de varios riegos sucesivos se establece un equilibrio entre las sales aportadas y las evacuadas por la red de drenaje.

Existen distintos métodos para estimar la fracción de lavado que se basan en distintas estimaciones de la salinidad media de la zona radicular (Ayers y Westcot, 1985 ; Hoffman, 1990; Pratt y Suarez, 1990). Las diferencias entre estos métodos son significativas y en particular si se compara con el método propuesto por Rhoades y Merrill (1976) para riegos de alta frecuencia. Las necesidades de lavado obtenidas empleando esta última aproximación son inferiores a las obtenidas por los otros métodos indicando que el incremento en la frecuencia del riego tiene efectos beneficiosos cuando se emplean aguas salinas, aunque trabajos posteriores (Shalhevent, 1991) han puesto de manifiesto que riegos de alta frecuencia no

siempre tienen ventajas frente a otros.

Las necesidades de lavado las podemos calcular según los siguientes métodos:

1) **Riego de alta frecuencia**, aspersión, goteos, etc. (Rhoades, 1974):

$$NL = \frac{CE_a}{5CE_x - CE_a}$$

Siendo:

NL : Necesidades de lavado en tanto por uno.

CE_a : Conductividad eléctrica del agua de riego ($dS\ m^{-1}$) a $25^\circ C$.

CE_x : Conductividad eléctrica del extracto de saturación ($dS\ m^{-1}$) a $25^\circ C$ del suelo que es capaz de tolerar un cultivo determinado.

2) **Riego de baja frecuencia**, por ejemplo por superficie:

$$NL = \frac{CE_a}{2CE_x}$$

NL : Necesidades de lavado en tanto por uno.

CE_a : Conductividad eléctrica del agua de riego ($dS\ m^{-1}$) a $25^\circ C$.

CE_x : Conductividad eléctrica del extracto de saturación ($dS\ m^{-1}$) a $25^\circ C$ del suelo que es capaz de tolerar un cultivo determinado.

3) **Cálculo de las necesidades de lavado** a partir de una extracción del agua del perfil distribuida como 40:30:20:10% para los cuatro primeros cuartos de la zona radicular (Ayers y Westcot, 1985; Hoffman, 1990; Pratt y Suarez, 1990).

Se define el factor de concentración como la relación que existe entre la conductividad eléctrica del agua de riego y la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

$$f_c = \frac{CE_a}{CE_x}$$

Tabla 18. Factores de concentración (f_c) para determinadas fracciones de lavado para una distribución radicular 40:30:20:10%.

Factor de concentración (f_c) ¹	Fracción de lavado
3.2	0.05
2.1	0.10
1.6	0.15
1.3	0.20
1.2	0.25
1.0	0.30
0.9	0.40
0.8	0.50
0.7	0.60
0.6	0.70
0.6	0.80

¹ $CE_a = f_c CE_x$; $CE_{zr} = 2 CE_x$

Estos resultados se obtienen determinando el promedio de la salinidad del agua contenida en la zona radicular aplicando a cada parte en la que se divide la zona ocupada por las raíces las siguientes expresiones:

$$FL_i = \frac{\text{Lamina lixiviada}}{\text{Lamina de riego}}$$

$$CE_{zri} = \frac{CE_a}{FL_i}$$

Donde tenemos que:

Lamina lixiviada = (lámina de riego - β Etc)

CE_{zri} : Conductividad eléctrica de la zona radicular i

β : fracción de extracción de agua por el cultivo para cada zona son: 40:30:20:10

El valor resultante es $CE_{zr} = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^{i=4} CE_{zri}$ donde $CE_{zr0} = CE_a$ y $CE_{zr4} = CE_d$

CE_d : Conductividad eléctrica del agua de drenaje (dS m^{-1})

Se tiene al final que la CE_{zr} es equivalente a la CE_x .

Los estudios de Maas y Hoffman (1977) y Maas (1984) indican que el crecimiento vegetativo disminuye linealmente con el aumento de la salinidad del extracto de saturación del suelo partiendo para cada cultivo de la salinidad umbral que es capaz de tolerar sin merma del rendimiento, aunque esta linealidad desaparece cuando las pérdidas de rendimientos superan el 50 por cien de la cosecha, valor que de todas formas desaconsejaría el cultivo. Aplicando esta respuesta lineal se tiene la ecuación :

$$Y = 100 - \alpha (CE_x - CE_u)$$

Y : porcentaje del rendimiento potencial (%)

CE_x : Conductividad eléctrica del extracto de saturación ($dS\ m^{-1}$) a 25 °C del suelo.

CE_u : Conductividad eléctrica umbral del cultivo ($dS\ m^{-1}$) a 25 °C ; para un rendimiento del 100%.

α : Pérdida del rendimiento por aumento en un punto de la salinidad

Las necesidades brutas de riego vendrán dadas por :

$$R = \frac{D}{1 - NL}$$

R : Necesidades brutas de riego

D : Dotación de riego necesaria para satisfacer la evapotranspiración del cultivo

$$D = (ET_c - P_{ef})/\eta_r$$

ET_c : evapotranspiración del cultivo (mm) ($ET_c = k\ ETo$; k coeficiente del cultivo considerado, valor variable a lo largo del ciclo productivo, y la ETo es la evapotranspiración de referencia).

P_{ef} : Precipitación efectiva durante el ciclo de cultivo (mm)

η_r : Eficiencia de la aplicación

La selección del cultivo se puede realizar teniendo en cuenta estos dos factores: por un lado la conductividad umbral del cultivo (CE_u) que nos va a dar idea de la viabilidad de nuestro agua para el riego o de las necesidades de lavado, en función del factor de concentración que nos relaciona CE_a y CE_x con la fracción de lavado, y por otra parte del valor de disminución del rendimiento por aumento en un punto de la salinidad (α) que nos informa sobre la sensibilidad del cultivo a variaciones de la salinidad, este último aspecto es importante tenerlo en cuenta dado que el suministro de un agua residual depurada puede no guardar un nivel constante y homogéneo en el contenido de sales afectando directamente a los rendimientos del cultivo elegido, por eso se recomienda no sólo elegir un cultivo con un umbral de salinidad alta sino también con una baja sensibilidad, un valor de α bajo.

Tabla 19. Riesgo de reducción del rendimiento por empleo de un agua salina de peor calidad que la establecida para el cultivo.

Cultivo	Pérdida de rendimiento por aumento unitario de la salinidad	Salinidad umbral del extracto de saturación 100% rendimiento	Salinidad umbral para el agua de riego $CE_a = CE_x/1.15$	Salinidad del agua de riego que produce esa pérdida de rendimiento
	%	dS m ⁻¹	dS m ⁻¹	dS m ⁻¹
Fresa	33.3	1.0	0.9	1.9
Cacahuete	29.4	3.2	2.8	3.8
Albaricoquero	23.8	1.6	1.4	2.4
Soja	22.2	5.5	4.8	5.8
Boysenberry	22.2	1.5	1.3	2.3
Zarzamora	22.2	1.5	1.3	2.3
Aguacate	21.3	1.3	1.1	2.1
Melocotonero	20.8	1.7	1.5	2.5
Loto de los pantanos	18.9	2.3	2.0	3.0
Almendro	18.9	1.5	1.3	2.3
Judía verde	18.9	1.0	0.9	1.9
Judías grano	18.9	1.0	0.9	1.9
Ciruelo	17.9	1.5	1.3	2.3
Sorgo	16.1	6.8	5.9	6.9
Calabaza	16.1	3.2	2.8	3.8
Pomelo	16.1	1.8	1.6	2.6
Cebolla	16.1	1.2	1.0	2.0
Limonero	15.9	1.7	1.5	2.5
Manzano, peral	15.9	1.7	1.5	2.5
Naranja	15.9	1.7	1.5	2.5
Nogal	15.9	1.7	1.5	2.5
Pimiento	14.1	1.5	1.3	2.3
Zanahoria	14.1	1.0	0.9	1.9
Pepino	13.3	2.5	2.2	3.2
Lechuga	13.0	1.3	1.1	2.1
Rábano	13.0	1.2	1.0	2.0

Tabla 19. Riesgo de reducción del rendimiento por empleo de un agua salina de peor calidad que la establecida para el cultivo.

Cultivo	Pérdida de rendimiento por aumento unitario de la salinidad	Salinidad umbral del extracto de saturación 100% rendimiento	Salinidad umbral para el agua de riego $CEa = CE_s/1.15$	Salinidad del agua de riego que produce esa pérdida de rendimiento
	%	dS m ⁻¹	dS m ⁻¹	dS m ⁻¹
Lino	12.0	1.7	1.5	2.5
Maíz	12.0	1.7	1.5	2.5
Maíz dulce	12.0	1.7	1.5	2.5
Patata	12.0	1.7	1.5	2.5
Trébol blanco	12.0	1.5	1.3	2.3
Trébol fresa	12.0	1.5	1.3	2.3
Trébol híbrido	12.0	1.5	1.3	2.3
Trébol rojo	12.0	1.5	1.3	2.3
Arroz	11.1	3.0	2.6	3.6
Veza de hoja estrecha	11.1	3.0	2.6	3.6
Caupí	10.5	2.5	2.2	3.2
Batatas	10.5	1.5	1.3	2.3
Loto	10.0	5.0	4.3	5.3
Col	9.8	1.8	1.6	2.6
Tomate	9.5	2.5	2.2	3.2
Cola de zorra	9.5	1.5	1.3	2.3
Vid	9.5	1.5	1.3	2.3
Remolacha de mesa	9.1	4.0	3.5	4.5
Habas grano	9.1	1.0	0.9	1.9
Nabo	9.0	0.9	0.8	1.8
Brócoli	8.9	2.8	2.4	3.4
Eragrostis	8.3	2.0	1.7	2.7
Espinaca	7.7	2.0	1.7	2.7
Maíz forrajero	7.6	1.8	1.6	2.6
Ballico	7.5	5.6	4.9	5.9
Alpiste bulboso	7.5	4.6	4.0	5.0
Esfaerofisa	7.2	2.2	1.9	2.9
Melón	7.2	2.2	1.9	2.9
Cebada forrajera	7.1	6.0	5.2	6.2
Trigo	7.1	6.0	5.2	6.2
Alfalfa	7.1	2.0	1.7	2.7
Agropiro crestado	6.9	7.5	6.5	7.5
Cáñamo	6.8	2.3	2.0	3.0
Grama	6.2	6.9	6.0	7.0
Festuca elevada	6.2	3.9	3.4	4.4
Apio	6.2	1.8	1.6	2.6
Elimo	6.1	2.7	2.3	3.3
dactilo ramoso	6.1	1.5	1.3	2.3
Remolacha azucarera	5.9	7.0	6.1	7.1
Caña de azúcar	5.8	1.7	1.5	2.5
Bersin	5.7	1.5	1.3	2.3
Trigo duro	5.5	5.7	5.0	6.0
Algodón	5.2	7.7	6.7	7.7
Cebada	5.0	8.0	7.0	8.0
Pasto de Sudán	4.3	2.8	2.4	3.4
Agropiro	4.3	7.5	6.5	7.5
Agropiro sibericum	4.1	3.5	3.0	4.0
Palmera datilera	3.6	4.0	3.5	4.5

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Doorenbos (1976) y Maas (1984)

5.2.2 Tolerancia de los cultivos al boro

Aún siendo un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de los cultivos es muy pequeña la concentración a la que empiezan a presentar síntomas perjudiciales. Los síntomas

de toxicidad aparecen cuando se alcanzan en las hojas superiores concentraciones de 250 mg kg⁻¹ en materia seca, aunque no todos los cultivos presentan la misma sensibilidad.

Tabla 22. Clasificación de cultivos según el nivel de tolerancia al Boro^{1,2}

Nombre científico de la planta	Nombre vulgar
Muy Tolerantes (6.0-15.0 mg L⁻¹)	
<i>Gossypium hirsutum</i>	Algodón
<i>Asparagus officinalis</i>	Espárrago
Tolerantes (4.0-6.0 mg L⁻¹)	
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo
<i>Lycopersicum lycopersicum</i>	Tomate
<i>Medicago sativa</i>	Alfalfa
<i>Vicia benghalensis</i>	Veza
<i>Petrocelinum crispum</i>	Perejil
<i>Beta vulgaris</i>	Remolacha azucarera
Moderadamente tolerantes (2.0-4.0 mg L⁻¹)	
<i>Letuca sativa</i>	Lechuga
<i>Brassica oleracea capitata</i>	Repollo
<i>Apium graveolens</i>	Apio
<i>Brassica rapa</i>	Nabo
<i>Poa pratense</i>	Poa de los prados
<i>Avena sativa</i>	Avena
<i>Zea mays</i>	Maíz
<i>Cynara scolymus</i>	Alcachofa
<i>Nicotiana tabacum</i>	Tabaco
<i>Brassica juncea</i>	Mostaza
<i>Melilotus indica</i>	Trébol dulce
<i>Cucurbita pepo</i>	Calabaza
<i>Melón</i>	Cucumis melo
Moderadamente sensibles (1.0 - 2.0 mg L⁻¹)	
<i>Capsicum annum</i>	Pimiento
<i>Pisum sativus</i>	Guisante
<i>Daucus carota</i>	Zanahoria
<i>Raphanus sativus</i>	Rabanito
<i>Solanum tuberosum</i>	Patata
<i>Cucumis sativus</i>	Pepino
Sensibles (0.75 - 1.0 mg L⁻¹)	
<i>Allium sativum</i>	Ajo
<i>Ipomoea batatas</i>	Batata
<i>Triticum aestivum</i>	Trigo
<i>Hordeum vulgare</i>	Cebada
<i>Helianthus annuus</i>	Girasol
<i>Vigna radiata</i>	Frijol chino
<i>Sesamum indicum</i>	Ajonjolí
<i>Lupinus hartwegii</i>	Altramuz
<i>Fragaria spp.</i>	Fresa
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Judía
<i>Phaseolus lunatus</i>	Judía lima
<i>Arachis hypogaea</i>	Cacahuete
Sensibles (0.5 - 0.75 mg L⁻¹)	
<i>Persea americana</i>	Aguacate
<i>Citrus paradisi</i>	Pomelo
<i>Citrus sinensis</i>	Naranja
<i>Prunus aemniaca</i>	Albaricoquero

Tabla 22. Clasificación de cultivos según el nivel de tolerancia al Boro^{1,2}

Nombre científico de la planta	Nombre vulgar
<i>Prunus persica</i>	Melocotonero
<i>Prunus avium</i>	Cerezo
<i>Prunus domestica</i>	Ciruelo
<i>Diospyrus kaki</i>	Caqui
<i>Ficus carica</i>	Higuera
<i>Vitis vinifera</i>	Vid
<i>Nogal</i>	Junglans regia
<i>Carya illinoensis</i>	Pecana
<i>Vigna unguiculata</i>	Caupías
<i>Allium cepa</i>	Cebolla
Muy sensibles ($< 0.5 \text{ mg L}^{-1}$)	
<i>Citrus limon</i>	Limonero
<i>Rubus spp.</i>	Zarzamora

¹ Fuente : Maas (1984)² Concentraciones máximas toleradas en el agua del extracto de saturación del suelo, sin pérdidas en el rendimiento ni afecciones sobre el crecimiento. Las concentraciones máximas para el riego se pueden considerar igual a las indicadas. En función de las condiciones del lugar y de la variedad empleada estos valores pueden diferir.

Sin embargo la capacidad de acumulación de este compuesto es alta. En recientes trabajos con cebada (Salé *et al.*, 1996) se han alcanzado concentraciones de 621, 46 y 1158 mg kg⁻¹ en materia seca respectivamente en ensilado, grano o paja de este cereal, cuando se tenían concentraciones en el extracto de saturación del suelo del orden de 15 mg L⁻¹. Afectan estos altos contenidos de boro al área foliar por necrosis en las hojas más viejas. Sin embargo, estos resultados que para el agricultor son beneficiosos supone un riesgo para el ganadero, pues según las recomendaciones del *National Research Council* (1980) de los Estados Unidos recomienda que el valor máximo tolerable de boro para el ganado es de 150 mg kg⁻¹. Debe tenerse en cuenta que las cantidades adecuadas son del orden de 20 a 100 mg kg⁻¹ (Gupta *et al.*, 1985). Esto nos lleva a diferenciar que la acumulación, en este caso de boro, tiene lugar en distinta proporción entre unos órganos y otros de la planta y por tanto tiene distinta repercusión según el destino de la producción. Si la concentración de boro supere los requerimientos del cultivo, se debe restringir el empleo de la masa vegetal en la alimentación de herbívoros, dedicarla mejor a la protección del suelo, y destinar como única producción la de

grano. Una vez más ponemos de manifiesto la importancia de establecer unos requisitos de calidad del agua residual en función del destino y dedicación de la misma.

5.2.3 Tolerancia a otros elementos presentes en el agua residual

En este apartado vamos a señalar algunas de las sustancias, en su mayoría metales pesados, que frecuentemente aparecen en el agua residual en cantidades por encima de lo normal.

Selenio

Al igual que el boro el selenio es un componente esencial de la dieta, con unas necesidades mínimas tanto para las personas como para los animales de alrededor de 0.05 a 0.10 mg kg⁻¹, consumos por debajo de estas tasas son considerados deficientes. Aplicaciones de Se de 0.025 mg L⁻¹ en el extracto de saturación suponen en una cosecha de cebada concentraciones de 0.09, 0.21 y 0.13 respectivamente en silo, grano o heno (Salé *et al.*, 1996), en este caso la mayor concentración se obtiene en el grano, aunque se aceptan hasta 2 mg kg⁻¹ como máximos niveles tolerables por los animales de granja.

Cobre y Molibdeno

La molibdenosis en rumiantes es el resultado de dietas con elevados contenidos en molibdeno que afecta al metabolismo del cobre induciendo una deficiencia de este último, por ello se suele manejar el contenido relativo Cu/Mo que en la dieta de estos animales debe ser superior a 2.0. Desequilibrios causados en el extracto de saturación del suelo se manifiestan en la producción forrajera o en el contenido de estos componentes en la producción en grano, y si este baja de este nivel, inferior a dos, se debe completar la dieta con cobre. Así relaciones de

Cu/Mo inferiores a dos son inaceptables. No obstante concentraciones altas de cobre pueden provocar deficiencias de hierro (síntomas de clorosis en las hojas).

Sin embargo, una deficiencia de molibdeno produce un descenso del rendimiento, debido a la acción específica del molibdeno en los complejos enzimáticos nitrógeno-reductasa y nitrogenasas. El contenido de este elemento en las plantas es del orden de 0.1 ppm en materia seca, aunque aumenta en el caso de las leguminosas hasta 0.5 ppm. La disponibilidad de este elemento aumenta con el pH del suelo.

Cobalto

Componente esencial en la dieta, pues forma parte de la vitamina B₁₂. Así mismo, las plantas y especialmente las leguminosas lo necesitan para la fijación del nitrógeno atmosférico a través de los nódulos de *Rhizobium* en las raíces, si bien son suficientes bajas concentraciones del orden de 0.1 ppm para cubrir las necesidades, encontrándose en cantidad suficiente en la mayoría de los suelos, contenido que se recomienda no exceder de 10 ppm, ya que excesos de cobalto pueden originar deficiencias en hierro por efectos antagónicos.

Níquel

Todavía no se tiene claro el papel del níquel en la fisiología de las plantas pero cuando éste está presente en el suelo lo absorben con facilidad. En condiciones normales su contenido en las plantas es del orden de 1 ppm sobre materia seca, sin embargo el contenido de níquel en el suelo varía entre 5 y 500 ppm debido a su alta movilidad, ya que las arcillas lo adsorben con dificultad.

Zinc

El zinc es un elemento que empieza a preocupar en las aguas residuales de origen agrario, especialmente en las procedentes de explotaciones ganaderas extensivas ya que el empleo como materia de recubrimiento en instalaciones ganaderas e industriales, sobre todo en la realización de tubos galvanizados ampliamente empleados en la realización de vallas, comederos, jaulas, etc., producen que los animales enjaulados y en especial aquellos con hábitos roedores al roer estos barrotes para limitar el crecimiento de su dentadura genera una ingestión desmesurada de este compuesto que al final va a parar al agua residual o a los purines de la explotación. Téngase en cuenta que también es un constituyente esencial al formar parte de enzimas como las deshidrogenasas y las peptidasas. Niveles inferiores a 125 ppm se consideran deficitarios en casi todas las especies animales. Valores en la dieta superiores a 1000 ppm se consideran tóxicos. En las plantas se encuentra como valor medio entre 30 y 50 ppm, su toxicidad se debe al antagonismo que presenta frente al fósforo o al hierro.

Al igual que con el cobre o el níquel el pH del suelo determina su disponibilidad. Se ha propuesto por diversos autores emplear para la medida relativa de la toxicidad de distintos metales el «factor equivalente de zinc» (FEZ) según el cual el cobre es dos veces más tóxico para las plantas que el zinc y el níquel lo es en ocho veces más, dadas las concentraciones en meq L^{-1} .

$$FEZ = 1x[Zn] + 2x[Cu] + 8x[Ni]$$

Se establece como límite de adición de estos metales al suelo cuando el FEZ llega al 50% de la CIC cuando el pH fuese menor de 6.5. Otros metales pesados adicionados con el agua residual requerirán un estudio específico de sus consecuencias particulares sobre el suelo y la vegetación.

5.2.4 Efecto de los organismos patógenos sobre los cultivos

Salvo cuando se trate de protozoos, helmintos, bacterias o virus que afecten a algún cultivo en particular, no suele ser normal su presencia y efectos directos sobre las plantas, excepción hecha de las aguas residuales procedentes de industrias agroalimentarias en las que habrá que estudiar detenidamente estos casos posibles, el resto de aguas residuales, urbanas sobre todo, no suelen tener un efecto directo sobre la vegetación, aunque sí indirectamente al afectar a la composición de la microfauna y microflora del suelo, en especial a las bacterias nitrificadoras y desnitrificadoras. El alto contenido en materia orgánica puede disminuir la capacidad de infiltración del suelo. En estos casos es el suelo el primeramente afectado y el que impone sus factores limitantes a considerar.

5.3 *Los cultivos ante las aguas residuales*

Los tipos de interacción entre el cultivo y el agua residual pueden ser **directas** o **indirectas**. Entre las primeras tenemos: a) Por contacto, como quemaduras, daños físicos y puntuales, b) Absorción foliar, ya que puede afectar a las partes más sensibles de la planta produciendo su acumulación en las zonas verdes más expuestas, c) Absorción radicular, es la forma más corriente de absorción de los macro y microelementos que requiere la planta, pero que también puede llevar a la absorción de elementos tóxicos. Dentro de las **indirectas** se incluye: la fitotoxicidad del suelo por acumulación de sustancias por encima de los valores que tolera el sistema radicular de la planta, retención o inmovilización de compuestos que como el fósforo son indispensables para el crecimiento del cultivo.

Los Principales daños que el agua de baja calidad puede ocasionar sobre el cultivo:

- 1.- **Daños superficiales:** Afectan principalmente al área foliar, produciendo una reducción efectiva del índice de área foliar y por tanto de la energía luminosa interceptada, reduciendo la tasa de crecimiento del cultivo.
- 2.- **Daños por desequilibrio de nutrientes:** Síntomas carenciales en función del compuesto que limite la producción, o antagonismo entre compuestos produciendo la carencia de uno de ellos.
- 3.- **Daños por fitotoxicidad:** Afectan en función del compuesto que se trate a distintos órganos de la planta, pueden causar la muerte del cultivo a la merma de la producción.
- 4.- **Daños ocultos:** Aquellas concentraciones de elementos que sin llegar a producir daños reales en la planta están en tales cantidades que impiden el normal aprovechamiento de la producción y por tanto hay una disminución total, ya que el cultivo no puede destinarse al consumo. De entre ellos, este es el más difícil de determinar al no producir un daño real, y el que más hay que controlar sobre todo con aguas de dudosa calidad sanitaria o con elevado contenido en elementos pesados.

Hay una gran diferencia entre el comportamiento de las plantaciones arbóreas y los cultivos agrícolas, las primeras tienen un menor contenido en nitrógeno que los cultivos pero éste es mayormente retenido y añade al suelo grandes cantidades de carbono.

En el caso de plantaciones arbóreas los factores más importantes que determinan la dinámica del N en el suelo son: el riego (disponibilidad de agua), la vegetación y la presencia de malas hierbas (plantas herbáceas). El riego incrementa las tasas de descomposición al proporcionar la suficiente humedad a los organismos descomponedores. Pero cuando el manejo lleva consigo la siega y consiguiente exportación de la biomasa acumulada en forma de malas hierbas se produce un rápido descenso de la materia orgánica del suelo, obteniéndose

tasa de mineralización superiores a $350 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la extracción de nitrógeno por las malas hierbas rondan los 300 a $420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en plantaciones con chopos empleadas como filtros verdes.

5.4 Condicionantes de calidad que deben cumplir los cultivos que se riegan con aguas residuales depuradas

La producción de cultivos con aguas residuales está encaminada a la obtención de productos de calidad, en buen estado y condiciones para su posterior aprovechamiento, sin que suponga comprometer la salud de las personas, animales o del medioambiente en general.

En este sentido se pronuncian todas las regulaciones emitidas hasta la fecha, para asegurar el cumplimiento de las condiciones higiénico sanitarias.

Durante el riego con aguas residuales depuradas se deberá tener presente además de las normas propias de este uso, las que determinan el contenido máximo permitido de sustancias y elementos de residuos que puede contener el suelo o las plantas y del máximo que pueden tolerar los animales o personas a las que la producción vaya destinada.

5.5 El suelo como elemento depurador

La aplicación de aguas de baja calidad supone la generación de impactos sobre el biosistema al verse sometido a unas características hídricas diferentes. En su paso a través del suelo van a encontrar: a) Un sistema radicular, del cultivo o vegetación establecida y que va a absorber la mayoría de los nutrientes solubles ; b) Las partículas del suelo que van a producir

una filtración mecánica de las sólidos en suspensión y una adsorción de bacteria, virus, fósforo, etc. y metales pesados, impidiendo que éstas sustancias se muevan hacia horizontes más profundos, pero que se van a acumular en estos horizontes superficiales; c) Los microorganismos del suelo van a realizar un consumo de distintos compuestos así como su participación en los procesos de nitrificación y desnitrificación, el resto de elementos.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que es la capacidad que éste presenta de intercambiar iones entre la solución acuosa y las partículas que constituyen la fracción sólida del suelo (principalmente arcillas y materia orgánica). Es un proceso de naturaleza físico-química que depende de las fuerzas de atracción entre los iones y el complejo de cambio o complejo adsorbente, formado por arcillas y materia orgánica humificada, por eso también se le conoce como complejo húmico-arcilloso, que se caracteriza por presentar carga negativa, por lo que retiene cationes (como calcio, magnesio, sodio, potasio, etc.). Así, la capacidad de intercambio catiónico de un suelo se mide como la cantidad total de cationes que el suelo puede retener. Existe un equilibrio entre los distintos cationes que están en la solución acuosa del suelo y en la fracción de tierras. Aunque, las plantas absorben los cationes presentes en la solución del suelo, al estar estos en equilibrio con los retenidos en el complejo de cambio, éstos últimos también puede ser liberados y pasar a la solución del suelo, pues existe un equilibrio entre ambas composiciones. No obstante, la principal diferencia es que mientras los iones contenidos en la solución del suelo se van a mover conforme lo haga la lámina hídrica, pudiendo ser lavados a capas más profundas sin ser aprovechados por el cultivo, no sucede lo mismo con los retenidos.

De esta forma se llega a dos importantes efectos del empleo de aguas residuales en el riego: a) El suelo va a ser capaz de retener aquellas sustancias que presentan cargas positivas reales o aparentes, que se comporten como tales, en estos casos la sustitución puede

desequilibrar la composición nutritiva de la solución del suelo y afectar así a las plantas ; y b) Las sustancias o elementos que permanezcan en la solución del suelo van a ser arrastrados por el movimiento del agua en el perfil, esto supone que en condiciones de riego en saturación, o mejor dicho con fracción de lavado una pérdida permanente de iones que dejan de estar a disposición de la planta por alcanzar capas más profundas del suelo. Al tiempo que favorecen una mayor liberación de cationes que están en el complejo de cambio, esta «reserva» de cationes del suelo constituye la fracción mayoritaria de su contenido.

Se define como, característica importante de la fertilidad y del estado de nutrientes de un suelo la tasa de saturación del complejo de cambio, midiéndose por el conjunto formado por Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , frente al contenido en cationes como el H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , etc. Sin embargo, este resultado debe acompañarse con la relación de adsorción de sodio (SAR) que es una medida del contenido relativo de calcio, magnesio y sodio, ya que este último catión en exceso puede presentar problemas, de infiltración, porque por su mayor tamaño separa las láminas que forman las arcillas, desagregando estas estructuras de las partículas del suelo, es decir se comporta como si se tratase de un dispersante o disolvente.

Tabla 23. Diagnóstico de la capacidad de intercambio catiónico.

CIC (meq 100g^{-1})	CIC
< 6	Muy débil
6-10	Débil
10-20	Media
20-30	Elevada
> 30	Muy elevada

En el caso de capacidades de intercambio catiónico (CIC) bajas significa que la reserva de cationes en el suelo es baja. Aunque, será necesario una menor cantidad de nutriente a añadir al suelo para conseguir iguales tasas de extracción que en el caso de CIC muy elevadas,

a pesar de indicar que se trata de suelos con alta fertilidad, también van a presentar tasas de retención mayores para mantener un nivel alto de cationes asimilables necesitando un aporte mayor.

El pH del suelo, es de los parámetros más sencillos de medir de un suelo y que además pueden reportarnos mucha información sobre su estado y evolución en el tiempo. Principalmente de la actividad biológica del suelo, así proceso tan importantes como la nitrificación (oxidación del ion amonio, NH_4^+ a ion nitrato NO_3^-) o la fijación de nitrógeno atmosférico por los *Rhizobium*, tienen un pH óptimo entre 6 y 6.5, desapareciendo totalmente a pH inferiores a 4.5. El contenido en carbonatos, y más en concreto el de caliza activa, favorece tanto el número de microorganismos como su actividad, aunque por ejemplo la nitrificación es prácticamente inexistente a pH mayores a 9. El pH realmente nos mide la reacción del suelo.

5.5.1 Comportamiento de los microelementos en el suelo

El movimiento del agua a través del suelo implica una serie de procesos físicos y químicos que afectan al comportamiento de los elementos que contiene. El primer proceso que tiene lugar es la filtración (Ives, 1971), los microelementos quedan retenidos en las partículas del suelo de los perfiles más superficiales, produciéndose su acumulación que puede llegar a afectar al desarrollo radicular de las plantas, pero una vez retenidos se producen diversas reacciones de intercambio catiónico, precipitación, adsorción superficial o de formación de complejos.

El comportamiento del suelo, ya sea este natural o artificial, esta condicionado por su textura, pH, contenido de materia orgánica y de la concentración de óxidos principalmente de aluminio, hierro y manganeso. Incluso se ha observado una alta capacidad de retención de cobre y plomo para una gran variedad de suelos (Fuller *et al.* 1976).

La retención de cationes, en general, aumenta conforme lo hace también el contenido en arcillas y de materia orgánica. Mientras, la solubilidad de los cationes aumenta a medida que los hace el pH, a la inversa que lo hacen los aniones.

Los cationes metálicos, también, tienden a asociarse con O^{2-} y OH^- , de forma que se favorece su precipitación como hidróxidos. Reacción ésta, de hidrólisis, que es semejante para todos los metales, aumentando su concentración en solución conforme disminuye el pH. Por esta razón en suelos de tipo calcáreo y de pH elevados, precipita el hidróxido o la sal en función de los aniones que predominen en solución, quedando de esta forma inmovilizados, disminuyendo los problemas de toxicidad por elementos pesados al no estar disponibles para la planta. Los metales de transición pueden formar complejos, que generalmente son solubles y aumentan la cantidad de metal en solución, aumentando su movilidad (riesgo de lavado) y su disponibilidad (riesgo de toxicidad).

Tabla 24. Acumulación máxima recomendada ($kg\ ha^{-1}$) de algunos metales pesados en las tierras de cultivo.

Elemento	Capacidad de intercambio catiónico meq/100g		
	Suelos arenosos < 5	Suelos franco- arenosos 5-15	Suelos arcillosos > 15
Plomo	560	1120	2240
Zinc	280	560	1120
Cobre	140	280	560
Níquel	140	280	560
Cadmio	5	10	20

Las condiciones de aireación del suelo, desde aerobiosis (con oxígeno) hasta anaerobiosis (sin oxígeno), van a determinar el estado de oxidación en que se puedan encontrar estos elementos, así suelos inundados provocan situaciones anaerobias que favorecen la presencia de sulfuros y formas reducidas de los metales.

Tabla 25. Cantidad límite de concentración de metales pesados en los suelos¹.

Elemento	Valor límite		
	Suelos con pH menor de 7 mg kg ⁻¹	Suelos con pH mayor de 7 mg kg ⁻¹	Cantidades anuales que se pueden introducir, media diez años kg ha ⁻¹ año ⁻¹
Plomo	50.00	300.00	15.00
Zinc	150.00	450.00	30.00
Cobre	50.00	210.00	12.00
Níquel	30.00	112.00	3.00
Cadmio	1.00	3.00	0.15
Mercurio	1.00	1.50	0.10
Cromo	100.00	150.00	3.00

¹ Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre (B.O.E. nº 262, de 1 noviembre 1990).

6. MANEJO DEL RIEGO

El riego y su manejo afectan a los parámetros de cultivo y a los objetivos que se quieren alcanzar con la aplicación o reutilización de las aguas residuales para el riego agrícola. Por ejemplo, distintos trabajos (Schipper *et al.* 1996) ponen de manifiesto la no existencia de diferencias significativas entre los tratamientos de riego con aguas de buena calidad, agua potable, y sin riego de una plantación para filtro verde de *Pinus radiata* D. Don, sin embargo si aparecieron y fueron significativas cuando se aplicó un agua depurada con tratamiento terciario, se encontró que las tasas de desnitrificación se duplicaron, este ello es de destacar si lo que se quiere es el efecto depurados y la pérdida de nitrógeno que se produce es buena, sin

embargo para los cultivos no interesaría perder ese nitrógeno, a no ser que hubiese un exceso del contenido de nitrógeno aportado con el agua residual.

6.1 Métodos de riego

Las aguas residuales urbanas en las zonas costeras suelen tener un contenido anormalmente alto de sales debido a la descarga que sobre la red principal de alcantarillado proviene de las piscinas, fuentes ornamentales, etc., que se alimenta de acuíferos próximos a la costa con contenidos elevados de sales, problema que puede incluso hacer inoperativos los procesos de depuración, sobre todo aquellos que se realizan con bacterias y otros microorganismos. Hay que hacer tres consideraciones iniciales: a) *la distribución del agua y de las sales en el suelo*; b) *sensibilidad del cultivo a la aplicación del agua salina sobre las hojas* y c) *la conveniencia de aplicar el agua con relativa frecuencia*. El punto b) se ha visto en apartados anteriores, en este haremos unas observaciones sobre los distintos sistemas de distribución del agua de riego en campo y la frecuencia que se puede alcanzar con cada uno de ellos.

Riego por superficie: Hay que estudiar distribución de las sales en el surco (Bernstein y Fireman, 1957). Esta distribución es función del movimiento del agua en el suelo y de las frecuencias del riego. Las zonas más saturadas de agua presentarán una menor concentración de sales y será mayor en aquellas zonas más secas, donde no llega bien el agua o la intensidad evaporativa es alta. Si bien la intensidad de la distribución vendrá dada por las características texturales del suelo.

Riego por aspersión: Su principal problema es el agua interceptada por la hoja u otras partes verdes de la planta, ya que pueden verse dañadas por alguno de los componentes presentes en el agua residual. Obteniéndose peores resultados con aplicaciones intermitentes,

pues la evaporación de la gota va concentrando la salinidad en ese punto de la superficie hasta que llega a dañar a los tejidos, problema que se reduce con aplicaciones continuas, que favorecen que la gota escurra y no se concentre sobre los tejidos. El daño en la hoja está directamente correlacionado con la frecuencia del riego y la temperatura. El riesgo se reduce cuando el riego es nocturno, pues disminuye la evaporación de las hojas y por tanto el depósito de sales sobre ella (Ehlig y Bernstein, 1959), aunque en determinadas ocasiones tiempo muy seco, altas temperaturas y viento pueden aumentar la evaporación nocturna, o por la aplicación de un agua limpia al final de cada ciclo de riego que lave los sedimentos depositados sobre las hojas.

El riego por aspersión con aguas residuales de origen doméstico proporciona un uso más y un tratamiento efectivo de este tipo de aguas problemáticas (Monnett *et al.*, 1995). La pérdida de nitrógeno a través de los procesos de nitrificación, en el caso de riego por aspersión, fluctúa por la alternancia de condiciones aerobias y anaerobias causadas por la frecuencia del riego las pérdidas de nitrógeno como N_2 -forma gaseosa- pueden alcanzar entre un 5 a un 25% del nitrógeno aplicado para dotaciones de riego de 12.5 a 25.0 mm semana⁻¹ (Monnett, 1995). Mientras la capacidad de desnitrificación está limitada por la relación entre el contenido de carbono y de nitrógeno (C/N), manteniendo unas tasas altas de aplicación se favorece la actividad microbiana incrementándose la pérdida de N por desnitrificación.

La aplicación en bajas cantidades con alta frecuencia (2-3 veces al día) incrementa los procesos de nitrificación, al tiempo que se crean unos estados más favorables entre las condiciones aerobias y anaerobias.

El **riego por goteo** ha revolucionado el empleo de aguas de baja calidad en agricultura. Ya que, por un lado, se reducen los daños sobre las hojas y, por otro, al mantener una zona húmeda entorno a las raíces del cultivo aleja la zona de acumulación de sales. Por ejemplo,

Bernstein y Francois (1973) encontraron diferencias del 50% entre pimientos regados por goteo frente a aspersión con un agua de 4.4 dS m^{-1} , sin que se apreciase ninguna diferencia cuando se empleaba agua no salina. La segunda ventaja viene dada por el mantenimiento de una zona del suelo con potenciales mátricos altos constantes, esto hace que las raíces del cultivo se distribuyan en la zona más lavada del suelo, con menor salinidad. Estas razones hacen del riego por goteo el sistema más apropiado para el empleo, desde un punto de vista exclusivamente agronómico, para aplicar aguas de baja calidad a los cultivos.

Riego bajo superficie: Aunque mantiene la ventaja de no afectar directamente al cultivo y en especial a la superficie foliar, presenta el inconveniente de la distribución de sales en el suelo. Comparando en maíz aspersión y riego subterráneo se observa como con este último sistema las sales se concentran en la parte superior del suelo y además siguen una distribución bastantes regular en todo el perfil (Hoffman *et al.* 1983).

El principal problema de los riegos de baja presión, goteo y subterráneo, es la obturación de los sistemas de distribución cuando se trata con aguas residuales con alto contenido de sólidos en suspensión, en estos casos se necesita la incorporación de un adecuado sistema de filtros, aunque por la calidad del agua requieran una continua limpieza.

No obstante, las casas de riegos comerciales tienen entre sus elementos catalogados equipos especialmente diseñados para en empleo de aguas residuales o de baja calidad, que tienen la ventaja de estar preparados para estas situaciones, aunque se necesita una evaluación de los mismos para ver sus eficiencias y su comportamiento ante estas situaciones.

Tabla 26. Recomendaciones para la elección del sistemas de riego con aguas residuales en función de las clases de cultivo

Cultivos	Sistema de riego			
	Aspersión	Superficie en surcos	Inundación	Goteo
Cereales, leguminosas grano y oleaginosas	Recomendable por su fácil manejo, aunque presenta problemas de deriva y producción de aerosoles, puede dañar las hojas, pero el secado en campo evita la mayoría del riesgo de contaminación por patógenos	Recomendable, pero se debe evitar el contacto con el agua, siembra o plantación en caballones	Recomendable, en zonas donde el fuerte viento impide la aspersión por los deriva de gotas de agua a parcelas próximas o en cultivos sensibles al daño foliar	Mejora la eficiencia de aplicación del agua, aconsejable como sustituto de los métodos de superficie e inundación y para cultivos sensibles al daño en hojas o la podredumbre del tallo
Hortícolas	Daños a la parte aérea y a la cosecha. Uso restringido o prohibido cuando el destino es para consumo en fresco	Puede producir contacto entre el agua y la parte productiva de la planta.	Más indicado, se evita el contacto directo del agua y la planta, siempre que el goteo se mantenga a nivel del suelo y exista separación de la planta.	Indicado para este tipo de cultivos si son perennes para los anuales presenta serios problemas de manejo y de implantación
Cultivos forrajeros	Puede dañar a las hojas y tallos. Requiere un tiempo de espera hasta el pastoreo	Necesita un tiempo de espera para pastoreo. Puede producir un exceso de humedad superficial que dificulte el pastoreo		Recomendable al no necesitar un retraso en el pastoreo
Cultivos leñosos	Dos casos, cuando la aspersión no alcanza a la cubierta, entonces puede dar buenos resultados, el otro caso se desecha para evitar dañar a las hojas y acumular sustancias contaminantes en los frutos o parte cosechable	Se evita el contacto directo del agua con la planta, se reduce el riesgo de deriva	Mayor control de la aplicación del agua, aunque como en los casos anteriores requiere un filtrado anterior	Recomendable por evitarse el contacto del agua residual no sólo con la planta sino también con los operarios, facilita el mantenimiento y las labores de cultivo
Forestales	Debe evitarse el contacto y la deriva	Presenta ventaja frente al resto al requerir un nivel menos de filtración y por tanto admite la aplicación de elevadas cargas de materia orgánica	La mismas ventajas que en surcos pero permite cultivar en las tablas de riesgo especies que extraigan mayores cantidades de ciertos elementos reduciendo el riesgo de contaminación de acuíferos, especialmente de nitratos	Especialmente aconsejable en zonas abiertas al público, ya que se evita en todo caso el contacto directo del agua con las personas, también recomendable cuando el nivel de olores del agua residual es alto
Ornamentales	Puede dañar a las hojas, requiere la restricción del paso en horas de riego. Riesgo de deriva.	Elevado riesgo de contacto, aunque se evitan los daños directos sobre las hojas	Recomendable, sobre todo cuando se trata de plantas anuales	Aconsejable en plantaciones permanentes, se reduce el riesgo de contacto al máximo y los daños por vandalismo del sistema de riego

6.2 Necesidades de un sistema de drenaje adecuado

El empleo de aguas de baja calidad va a requerir un aumento de las aguas de drenaje o de la fracción de lavado para garantizar que el contenido de sales y otras sustancias en el suelo no supera los límites establecidos por el cultivo. Garantizar un correcto funcionamiento del drenaje es fundamental para mantener no sólo controlada la conductividad eléctrica del extracto de saturación sino, también, del resto de componentes del agua residual. Por estas razones se deben considerar los tres factores que determinan la eficacia del sistema de drenaje: *profundidad crítica, coeficiente de drenaje y las características del suelo.*

Profundidad crítica: Para obtener un buen drenaje, se debe establecer un flujo de agua hacia abajo que permita arrastrar las sales sobrantes. Movimiento que debe ser lo suficientemente lento como para que el agua de riego se mezcle perfectamente con el agua en la matriz del suelo y así arrastre sales, y lo suficientemente rápido como para que se aire bien el suelo. Esta profundidad debe ser tal que permita el buen desarrollo radicular del cultivo y que esta zona esté bien aireada. Esta profundidad suele ser de 1 metro (depende del cultivo y del tipo de suelo), estando los drenes situados a una profundidad variable entre 1 y 1.5 m. En los sistemas de cultivo sin suelo, esto se consigue dando una pendiente suficiente a la cama de siembra para que el agua sobrante se evacue conforme al tiempo de permanencia especificado.

Coeficiente de drenaje depende de las necesidades de lavado y de la velocidad del lavado. Es decir el diseño de la localización de drenes viene no sólo dado por la cantidad de agua a drenar sino también por el calendario de lavados.

Influencia sobre las características del suelo: Las principales propiedades del suelo en relación al drenaje son la conductividad hidráulica (k) y la porosidad del suelo (p).

pero además cuando el agua tiene una alta relación SAR ajustada empeoran la estructura del suelo, alta concentración de Na^+ frente al Ca^{2+} . esto produce una expansión y dispersión de las arcillas del suelo.

6.3 Manejo del sistema de riego y drenaje

El empleo de aguas residuales depuradas para el riego requiere, independientemente de su procedencia, una continua labor de control y seguimiento de los principales parámetros del riego, y sobre todo de la calidad del agua en todos los puntos del sistema. Estos son:

1ª. Control de la fiabilidad del tratamiento en planta depuradora de aguas residuales, control de la calidad del agua residual depurada: Asegurar que el tratamiento sea fiable, tratamiento y control que no tiene por que realizarlo el agricultor, pero como la dotación de agua para riego es actualmente por concesión administrativa, corresponderá a la administración responsable velar por la calidad del agua, para que al agricultor le sea suministrada el agua de «diseño» conforme a las características especificadas en el proyecto de reutilización.

2ª. Evitar la interconexión de tuberías: Las conducciones de agua residual y de agua no residual deben ser distintas y no tener puntos en común. Tanto en zonas urbanas cuando se emplea para el riego de parques, jardines e instalaciones deportivas, como en área rurales. Todos los elementos, tuberías, válvulas, etc. deberán ir convenientemente señalizados, ya sea con distintivos de color o por diferencias en los materiales. también se deberán mantener convenientemente actualizados los planos y especificaciones de todos los tipos de tuberías existentes en el área de aplicación.

3ª. Prevención del contacto del público con el agua residual depurada: La mejor prevención es la información mediante paneles indicadores o vallas para restringir el paso o su uso. En este punto hay que tener especial control de los aerosoles y gotas de aguas arrastradas por el viento cuando el riego se efectúe por aspersión, hay que respetar las zonas de protección (entre 15 y 90 metros según los casos). Colocar barreras protectoras contra el viento alrededor de las zonas regadas y emplear apersones de baja presión que dan una gota más gruesa, y por tanto con menor riesgo de deriva, y de baja altura sobre el suelo. Cuando el riego es localizado o superficial el riesgo de deriva por aerosoles desaparece. Por ello, se deberá regar con aspersión solo cuando la velocidad del viento sea escasa, siempre y cuando el destino del cultivo o de la zona regada lo permita y no tenga otro tipo de restricciones más severa.

Regar en aquellas horas cuando el riesgo de contacto con el público es mínimo. Los riegos nocturno son aconsejables pues permiten regar cuando las zonas verdes está cerradas o al menos con el menor público posible y se aprovechan las horas valles, cuando el riego es más barato.

4ª. Confinamiento de la aplicación: El riego con agua residual debe quedar reducido al área asignada y proyectada para tal fin. Cualquier ampliación deberá estudiarse y comunicarse a los organismos correspondientes. El riego debe controlarse para evitar que se formen encharcamientos, escorrentías superficiales o profundas, y puedan causar estragos en zonas adyacentes.

5ª. Mantenimiento en buen estado de las instalaciones de riego: Como cualquier otra instalación deberán revisarse regularmente todos los equipos de los que consta el sistema de riego. En la actualidad ya algunas casas comerciales de riego comercializan productos

especialmente preparados para el empleo de aguas de baja calidad o aguas residuales, que evitan fenómenos de corrosión, obturaciones, etc., y así mantienen una mayor eficiencia en el riego, a la vez que se prolonga su vida útil.

Tabla 27. Sustancias disueltas o en suspensión que pueden provocar distintos daños en los sistemas de riego a presión y localizado cuando se emplean aguas residuales.

Físicos	Químicos	Biológicos
Sólidos en suspensión	Sustancias en disolución con riesgo de producir precipitados o daños por corrosión	Acumulación de organismos vivos: bacterias y algas, principalmente
<ul style="list-style-type: none"> - Arenas - Limos - Arcillas - Materia orgánica - Plásticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Carbonatos de Ca y Mg - Sulfato de calcio - Metales pesados: óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuro. - Oxígeno disuelto - Fertilizantes - Ácidos - Otros compuestos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Filamentos - Mucílago - Depósitos microbianos (fosfatos, azufre y manganeso) - Bacterias - Pequeños organismos acuáticos (como huevos, larvas, etc)

Fuente: Adaptado y ampliado de Bucks *et al.* (1979) para el agua residual.

6.4 Otras recomendaciones para el uso de aguas residuales en riegos

A continuación, recogemos las principales recomendaciones dictadas por el Ministerio de Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica acerca de la reutilización de aguas residuales para el riego agrícola y de zonas verdes, como guía a seguir en el empleo de este tipo de aguas residuales en la agricultura. Estas recomendaciones completan los niveles exigibles de calidad dados por el Estado de California y que hemos seguido en este texto.

La distancia de seguridad se recomienda para proteger las aguas potables de los riesgos de contaminación debidos al agua residual y para proteger a las personas de los riesgos debidos al contacto con el agua residual.

Estas normas están basadas en las prácticas de reutilización y del empleo de aguas residuales en los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla 28. Zonas de protección que se deben establecer para proteger las aguas potables en la reutilización de aguas residuales (USEPA, 1992).

Tipos de reutilización	Zonas de protección
Urbanos	
Todos los tipos de riegos de jardines (parques, campos de golf, cementerios, etc.) y otros usos de igual exposición al agua.	15 metros a las zonas de agua potable
Acceso restringido: zonas de riego	
césped, riego silvícola y otras áreas de acceso prohibido al público, restringido o infrecuente	<ul style="list-style-type: none"> · 90 metros a las aguas potables · 30 metros a las zonas accesibles al público, cuando el sistema de riego sea por aspersión
Reutilización en agricultura: cultivos para alimentos frescos	
Riego por superficie o aspersión de cualquier cultivo incluidos los de consumo en fresco	15 metros a las zonas de agua potable
Reutilización en agricultura: cultivos alimenticios con proceso comercial	
Riego por superficie de hortalizas y viñedos	<ul style="list-style-type: none"> · 90 metros a las aguas potables · 30 metros a las zonas accesibles al público, cuando el sistema de riego sea por aspersión
Reutilización en agricultura: cultivos no alimenticios	
Pastos para la producción de leche; forrajeros, fibras y semillas	<ul style="list-style-type: none"> · 90 metros a las aguas potables · 30 metros a las zonas accesibles al público, cuando el sistema de riego sea por aspersión
Lagos y acumulaciones de agua para usos recreativos	
Contacto accidental (pesca y remo) y contacto total previo permiso	150 metros a las aguas potables si la base no está sellada

Los límites de calidad aplicados al agua residual se deben aplicar al punto de descarga desde la planta de tratamiento. El tratamiento secundario incluye procesos biológicos activos, filtrado, biodiscos, y sistemas de estabilización. En general el tratamiento secundario producirá un efluente en el que la DBO₅ y los sólidos en suspensión (SS) no superen los 30 mg/l. La filtración lo constituye el paso del agua residual a través de suelos naturales o a través de filtros de arena o antracita. La desinfección constituye la destrucción, inactivación o la retirada de microorganismos patógenos por procesos químicos, físicos o biológicos. La desinfección irá acompañada por una cloración, tratamiento con ozono u otros procesos químicos

desinfectantes, radiación UV, procesos de membrana o similares. La turbidez se mide antes de la Desinfección (La turbidez no excederá de 5 NTU en ningún caso). Los valores límites de coliformes se determinan como resultados bacteriológicos de los siete días para los que los análisis son completados. El número de coliformes fecales no deberá exceder en ninguna muestra los 14/100 ml. El cloro residual se medirá después de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos. El nivel de patógenos incluirá todos tipo de componentes microbiológicos y habrá que caracterizarlos previamente al programa de reutilización. El número de coliformes fecales no podrá exceder 800/100 ml en ninguna muestra.

Los cultivos para alimentación con proceso industrial son aquellos que antes de su venta al público han tenido un proceso químico o físico suficiente como para destruir los organismos patógenos, por eso se exige un nivel de calidad menor al agua residual depurada.

Tratamientos avanzados o terciarios incluyen: clarificación química, adsorción por carbón activo, ósmosis inversa y otros procesos de filtración por membrana, corrientes de aire, ultra Filtración o intercambio iónico.

En todos los caso, el seguimiento de la calidad del agua reutilizada de incluir los componentes orgánicos e inorgánicos y sus clases, que son conocidos o se supone que pueden ser tóxicos, cancerígenos, teratogénicos o mutagénicos y que no están incluidos en las normas de calidad del agua potable.

7. HACIA UN USO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

En los próximos años vamos a presenciar un incremento del uso de aguas residuales en la agricultura, especialmente en aquellas áreas donde el agua escasea y donde se dan las condiciones óptimas para un cultivo intensivo, de primor y que tiende cada día más a ser

respetuoso con el medio ambiente. El levante español cumple sobradamente estos requisitos, además presenta la ventaja de que cuadriplica su población urbana gusto en los meses de verano que son cuando más demanda de agua tienen los cultivos, por ello el destino de las aguas residuales urbanas para el riego va a ser un hecho, o cuando no se destinaran para el riego de zonas verdes. Un bien escaso como es el agua se puede de esta forma emplear de forma sostenible ampliando el número de usos dados y ayudando de forma natural al proceso de regeneración de las aguas residuales de origen urbano.

La no reutilización de aguas residuales ha producido la masiva descarga sobre los cauces naturales de aguas de muy baja calidad. Esta es una de las causas principales de la aparición de *Cyanobacterias* y de la eutrofización de las aguas vivas, debido al incremento de las concentraciones de nitrógeno y fósforo. Proceso que también ocurre con las aguas de drenaje y de escorrentía de numerosas zonas regables. La reutilización también actúa reduciendo las sustancias contaminantes vertidas a nuestros cursos fluviales, mejorando por tanto la calidad de las aguas de estos cauces.

Hasta la fecha, no se ha regulado convenientemente el uso de este tipo de aguas, tanto a nivel de la Unión Europea como estatal, pero es recomendable seguir las normas que en la actualidad se están aplicando en otros lugares como es el caso del estado de California, o al menos las directrices propuestas por la Agencia de Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, 1992), ya que se han desarrollado en áreas geográficas análogas a los problemas que presentan nuestras zonas urbanas y agrícolas del levante peninsular.

Finalmente destacamos el proceso que debe seguirse para la aplicación de este tipo de aguas:

- a) **Caracterización del agua residual disponible para el riego.** Determinación de sus parámetros de calidad. Caudales disponibles, variaciones estacionales, y si existen normas específicas sobre su reutilización.

b) **Selección de los cultivos apropiados** o tolerantes al contenido de sales y demás sustancias en disolución o suspensión. Deben compararse la calidad del agua de riego disponible con la calidad que el cultivo elegido requiere de ese agua. Se debe componer una tabla comparativa en la que conste en la primera columna el parámetros de calidad, en la segunda la concentración máxima y mínima que presenta el agua residual, en la tercera la concentración a partir de la cual es perjudicial al cultivo, en la cuarta la concentración a partir de la cual se acumula en el suelo en cantidades no tolerables y en la quinta columna los niveles legales permitidos que pueden presentar los parámetros de calidad.

c) **Diseño de un sistema de riego y drenaje** que permita el uso de este tipo de aguas.

Las técnicas de riego a emplear se pueden resumir en aquellas que impidan el contacto directo entre el cultivo y el agua residual, la más recomendable es el riego por goteo superficial o enterrado. Si bien, deben tomarse las precauciones debidas para evitar la obturación y envejecimiento prematura del sistema de distribución. En otros casos el riego por aspersión puede dar resultados igual de satisfactorios. Estos tres primeros puntos definen lo que será el proyecto de transformación y riego con aguas residuales, que será el paso previo para la presentación ante el organismo de cuenca correspondiente de la oportuna concesión administrativa que autorice al agricultor el uso del agua residual, al que se le asignará una determinada dotación de agua de riego. Al mismo, tiempo es aconsejable solicitar ante el citado organismo unos niveles mínimos de garantía de la calidad del agua que se le esta asignando.

d) **Mantenimiento de las propiedades físico-químicas del suelo** que aseguren su estabilidad, una adecuada permeabilidad que permita el adecuado consumo de agua por el cultivo y permita suministrar las cantidades de lavado necesarias conforme el tipo de suelo, mediante tratamientos terciarios o especiales de depuración del agua

bruta. Se debe realizar un seguimiento de las características del suelo.

- e) **Control del estado sanitario del cultivo y del suelo** durante todo el proceso productivo. Establecer los mecanismos de control requeridos, que serán análisis foliares, del suelo y de la calidad de las aguas.

Conviene no obstante definir la calidad mínima exigible para regar que nos asegure el mantenimiento de unas buenas condiciones sanitarias en el cultivo, en el suelo y en el producto final. Para ello es básico definir si hay necesidad de realizar un tratamiento adicional al que ya tenga ese agua residual depurada, que proporciones esa calidad mínima en cada uno de los estados de crecimiento del cultivo. El contenido en metales pesados y las características microbiológicas del agua residual son los aspectos que a diferencia de los riegos convencionales hay que controlar, dificultad que se refleja en el número de determinaciones a realizar para obtener una analítica, básica para la planificación del riego.

El empleo de aguas residuales depuradas para el riego requiere un mejor conocimiento de la calidad del agua de riego durante todo el ciclo de cultivo. De tal forma que siempre se cumplan los requisitos de calidad que presenta tanto el cultivo como los de orden técnico y sobre todo sanitarios. Ejerciendo estos tipos de controles, junto con la adecuada selección de cultivos y sistemas de riegos, las aguas residuales pueden tratarse igual que cualquier otro tipo de agua, dando iguales rendimientos y en algunos casos aportando niveles de fertilizantes adicionales. La costa levantina, va a poder aprovechar en los próximos años del orden de 500 Hm³ de aguas residuales depuradas de origen urbana para el riego de cultivos o de zonas verdes. Desde estas líneas esperamos contribuir a la difusión de la importancia que para mantener un medioambiente saludable tiene la reutilización de aguas residuales urbanas, como guía para seguir las normas y los requisitos indicados, evitando así que las aguas contaminadas terminen por ahogar los ríos o mares que debemos transmitir a las generaciones futuras.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ableman, M. 1993. From the good Earth, traditional farming methods in a new age. Thames and Hudson, London, UK, 168 pp.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W., 1987. La calidad del agua de riego. Estudio FAO Riego y drenaje nº 29, rev.1. FAO. Roma, 174 pp.
- Bernstein, L.; Fireman, M. 1957. Laboratory studies on salt distribution in furrow irrigated soil with special reference to the pre-emergence period. Soil Science 83: 249-263.
- Bernstein, L.; Francois, L.E., 1973. Comparisons of drip, furrow and sprinkler irrigation. Soil Science 115: 73-86.
- Bucks, D.A.; Nakayama, F.S.; Gilbert, R.G. 1979. Trickle iirigation with high salt-content water. Trans. Amer. Soc. Agric. Engineers (ASAE) 10(4) :494-496.
- C.D.H.S., California Departament of Health Services (1978). Wastewater reclamation criteria. California Administrative Code, title 22, Division 4, Environmental Health. California Departament of Health Services, Berkeley, California.
- Chang, A.C.; Page, A.L. 1990. Destino de los componentes del agua residual en el suelo y en los acuíferos: los microcontaminantes orgánicos. En R. Mujeriego (ed.): Riego con agua residual municipal regenerada. Univesitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 379-398.
- Contreras, A; Molero, M. 1993. Introducción al estudio de la contaminación y su control. UNED, Madrid. 492 pp.
- Ehilig, C.F.; Bernstein, L. 1959. Foliar absortion of sodium and chloride as a factor sprinkler irrigation. Proc. Amer. Soc. Hortic. Sci. 74: 661-670.

- Fernández, C.; de la Torre, A.I.; Carbonell, G.; Muñoz, M.J.; Tarazona, J.V. 1995. Evaluación toxicológica del riesgo medioambiental ligado al vertido de los purines. En I Congreso Nacional de Veterinaria y Medio Ambiente, Murcia 13 a 15 de diciembre. Pp 305-318.
- Fuller, W.H.; Corte, N.E.; Niebla, E.E.; Alesi, B.A. 1976. Contribution of soil to migration of certain common and trace metals. *Soil Science*, 122: 223-235.
- Galán Pardo, A.; Hernández Díaz-Ambrona, C. 1997. Metodología para la decisión de riego con agua residual en el medio rural. En 27ª Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Vol. II. Comunicaciones, Zaragoza, pp 76-87.
- Glenn, E.P. ; Brown, J.J. ; O'Leary, J. 1998. Riego con agua del mar. *Investigación y Ciencia*, 265: 58-63.
- Gupta, U.C., Jame, Y.W. ; Campbell, C.A ; Leyshon, A.J. ; Nicholaichuk, W. 1985. Boron toxicity and deficiency : A review. *Can. J. Soil. Sci.* 65 :381-409.
- Hernández Díaz-Ambrona, C. 1997. Agricultura y alimentación. *Agricultura* 66 (777) 269-272.
- Hoffman, G.J. 1983. Slat tolerance of corn in the Delta. *California Agriculture* 37:7 July-August.
- Hoffman, G.J. 1990. Leaching fraction and root zone salinity control. In K.K. Tanji (ed.) *Agricultural salinity assesment and management*. ASCE Manuals and reports on Engineering Practice nº 71. ASCE, New York, pp. 237-261.
- Inglés, A. ; Gómez, M. ; Nogales, R. 1992. Efecto del riego con aguas residuales urbanas depuradas sobre la disponibilidad de metales pesados en la planta. *Suelo y planta*, 2(4)703-712.
- Ives, 1971. Filtration of water and wastewater. *Critical Reviews of Enviromental Control*, 2: 292-335.
- Maas, E.V. 1984. Salt tolerance of plants. In the *Handbook of Plant Science in Agriculture*. B.R. Christie (ed.) CRC Press, Boca Ratón, Florida.

- Maas, E.V.; Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance: current assessment. J. Irrigation and Drainage Division, ASCE 103(IRZ): 115-135. Proceeding paper 12993.
- Monnett, G.T.; Reneau, R.B. Jr.; Hagedorn, C. 1995. Effects of domestic wastewater spray irrigation on denitrification rates. J. Environ. Qual. 24:949-946.
- Moreno, A.M. ; Pérez, L. ; González, J. 1992. Relaciones entre contenidos totales de Zn, Pb, Cu y Cd en suelos y plantas. Suelo y planta, 2(4)757-772.
- Myers, B.; Bond, W.; Falkiner, R. ; O'Brien, N. ; Polglase, P. ; Smith, C. ; Theiveyanathan, S. 1995. Effluent irrigated plantations : Design and management. Technical paper No. 2. CSIRO Division of Forestry, Australia, 24 pp.
- National Research Council (1980). Mineral tolerance of domestic animals. Natl. Acad. of Press, Washington, DC.
- Navarro Balsalobre, J. 1997. Determinación de las posibilidades de reutilización agrícola de los efluentes urbanos procedentes de la estación depuradora de aguas residuales de Elda (Alicante). En 27ª Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, Vol. II. Comunicaciones, Zaragoza, pp 127-132.
- Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. OMS. Ginebra, 1989.
- Plan Hidrológico Nacional, 1993. Avance del Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Obras Públicas y Medioambiente. Madrid.
- Pratt, P.F.; Suarez, D.L. 1990. Irrigation water quality assessments. In K.K. Tanji (ed.) Agricultural salinity assesment and management. ASCE Manuals and reports on Engineering Practice nº 71. ASCE, New York, pp. 220-231.
- Rhoades, J.D. 1974. Drainage for salinity control. In Drainage for Agriculture. Van Schilfgaarde J. (ed.) American Society of Ahronomy. Monograph Nº 17, pp 433-462.

- Rhoades, J.D. ; Merrill, S.D. 1976. Assessing the suitability of water for irrigation : Theoretical and empirical approaches. In Prognosis of salinity and alkalinity. FAO Soils Bulletin 31. FAO, Rome. pp 69-110.
- Salé, L.Y. ; Naeth, M.A. ; Chanasyk, D.S. (1996). Growth response of barley on unweathered fly ash-amended soil. J. Environ. Qual. 25 : 684-691.
- Schipper, L.A.; Williamson, J.C.; Kettles, H.A.; Speir, T.W. 1996. Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. J. Environ. Qual. 25:1073-1077.
- SELCO, 1995. Ecopurín: gestión y tratamiento de purines. En I Congreso Nacional de Veterinaria y Medio Ambiente, Murcia 13 a 15 de diciembre. Pp 305-318.
- Shalhevet, J. 1994. Using water of marginal quality for crop production: major issues. Agricultural water management, 25: 233-269.
- Suarez, D.L. 1981. Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Sci. Amer. J. 45: 469-475.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Guidelines for water reuse. USEPA, september.



Foto 1.

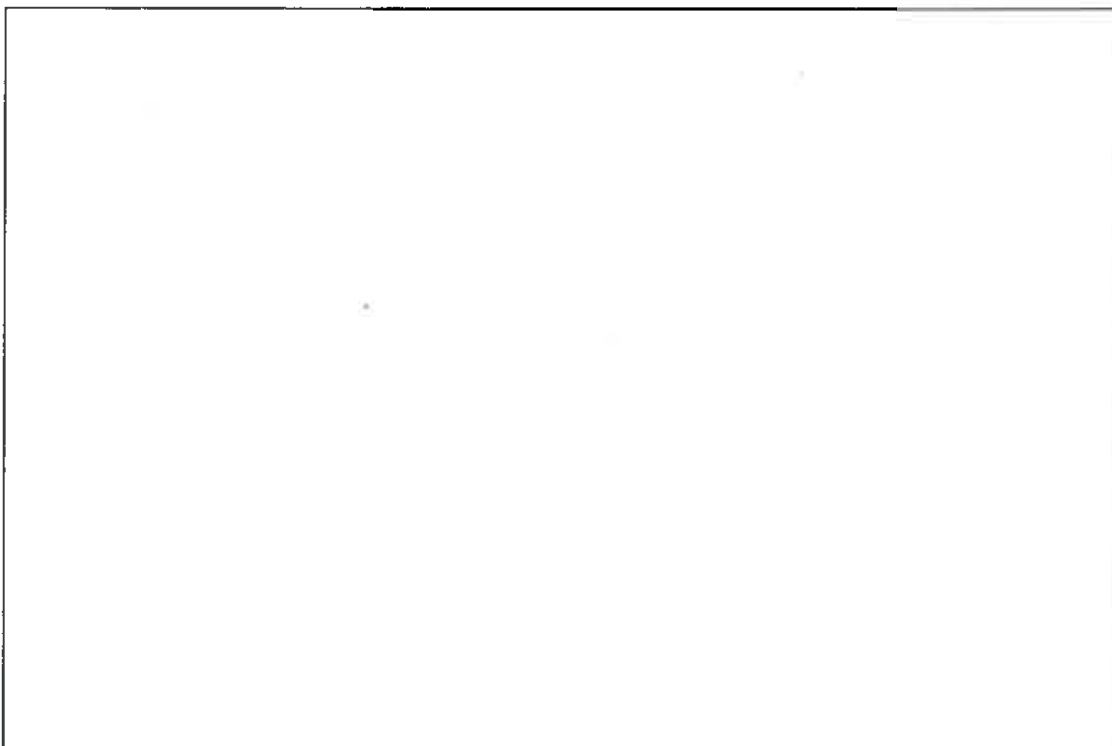


Foto 2.

Efecto de la descarga de aguas residuales insuficientemente depuradas sobre un cauce. En la Foto 1 se aprecia la situación antes del vertido. En la Foto 2 se puede observar a simple vista los efectos del vertido, causados por una proliferación de algas y avanzado estado de eutrofización, disminuye el contenido de oxígeno y favorece la producción de olores desagradables.



Foto 3.

La agricultura intensiva en invernaderos bajo plástico, en zonas donde el agua es un bien escaso se ve obligada al empleo de aguas de baja calidad, excesivamente salinas, pero con la posibilidad del uso de aguas residuales urbanas depuradas.



Foto 4.

Los sistemas de cultivo bajo invernadero, facilitan el empleo de las aguas residuales depuradas. el riego por goteo evita el contacto directo del agua con el cultivo y los distintos substratos empleados facilitan la fertilización y la recuperación de las aguas de drenaje, lo que permite cerrar en ciclo del agua dentro de la propia explotación.